

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**

**Факультет електроенерготехніки та автоматики**

**Кафедра теоретичної електротехніки**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка**

**на тему: «Динамічні характеристики обмежувачів перенапруг  
нелінійних»**

Виконав:

студент VI курсу, групи ЕВ-81мп

Манзуля Руслан Олександрович \_\_\_\_\_

Керівник:

К.т.н. доцент

Троценко Є. О. \_\_\_\_\_

Консультант з маркетингу:

Ст. викладач кафедри промислового маркетингу, к.е.н.,

Царьова Т. О. \_\_\_\_\_

Рецензент:

Засвідчую, що у цій магістерській  
дисертації немає запозичень з праць  
інших авторів без відповідних  
посилань.

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2019 року

**Національний технічний університет України**  
**«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»**  
**Факультет електроенерготехніки та автоматики**  
**Кафедра теоретичної електротехніки**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність – 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (спеціалізація «Електротехнічні пристрої та електротехнологічні комплекси»)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ М. Я. Островерхов

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**  
**на магістерську дисертацію студенту**  
**Манзуля Руслан Олександрович**

1. Тема дисертації **«Динамічні характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних»**, науковий керівник дисертації Троценко Євгеній Олександрович, к.т.н., доцент, затверджені наказом по університету від «15» листопада 2019 р. №3923-с
2. Термін подання студентом дисертації 16.12.2019 р.
3. Об'єкт дослідження: Динамічні характеристики ОПН
4. Вихідні дані: Моделі основних ОПН
5. Перелік завдань, які потрібно розробити: дослідження моделей ОПН що запропонована на кафедрі «Теоретичної електротехніки» КПІ ім. Ігоря Сікорського, удосконалити запропоновані моделі, порівняти з існуючими моделям, дослідження динамічних характеристик ОПН,
6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу : презентація на тему магістерської дисертації.
7. Орієнтовний перелік публікацій: 5 публікацій

## 8. Консультанти розділів дисертації

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розроблення стартап-проекту	Царьова Т. О., ст. викладач кафедри промислового маркетингу		

9. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Призначення та принцип дії вентильних розрядників та обмежувачів перенапруг нелінійних	20.09.2019	
2.	Захисні характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних	27.09.2019	
3.	Схемотехнічне моделювання схем захисту підстанцій від перенапруг за допомогою ОПН в MICRO-CAP EVALUATION VERSION	08.10.2019	
4.	Розробка стартап-проекту	21.11.2019	
5.	Підготовка графічної частини	02.12.2019	

Студент

Р. О. Манзуля

Науковий керівник дисертації

Є. О. Троценко

## РЕФЕРАТ

Дипломний проект містить: сторінок – 172, рисунків – 64; таблиць – 13, посилань – 37 та графічну частину на листах формату А4.

У магістерській дисертації досліджено захисні характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних.

Виконано схемотехнічне моделювання схем захисту підстанцій від перенапруг за допомогою ОПН в MICRO-CAP EVALUATION VERSION.

Виконано схемотехнічне моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг в MICRO-CAP EVALUATION VERSION

Запропоновані моделі можуть бути використані аби правильно відтворити реальні умови роботи ОПН при грозових та комутаційних перенапруг, збільшити точність та полегшити процес розрахунку його параметрів

Ключові слова: постійний струм, постійна напруга, змінна напруга, частковий розряд, ОПН, вентильні розрядники, передача постійного струму, схемотехнічне моделювання, лабораторний стенд, Micro-Cap Evaluation Version.



## SUMMARY

Diploma project consist: pages - 172, pictures - 64; tables - 13, reference - 37 and graphic part on the sheets of A4 format.

In the master's thesis the protective characteristics of surge arresters of nonlinear ones are investigated.

Circuit simulation of overvoltage protection circuits using metal oxide surge arresters in MICRO-CAP EVALUATION VERSION is performed.

Schematic simulation of nonlinear surge arresters in MICRO-CAP EVALUATION VERSION

The proposed models can be used to correctly reproduce the real conditions of generating a surge arrester in lightning and switching surges, to increase the accuracy and to facilitate the process of calculating its parameters.

Keywords: direct current, constant voltage, alternating voltage, partial discharge, metal oxide surge arresters, valve arresters, direct current transmission, circuit modeling, laboratory stand, Micro-Cap Evaluation Version.

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ

РВ – вентильні розрядники

ОПН – обмежувачі перенапруг нелінійні

ВАХ – вольт-амперна характеристика

ЛЕП – лінії електропередачі

РП – розподільні пристрої

ПС – підстанції

ЗА – захисні апарати

ЧР – часткові розряди

ПЛ – повітряні лінії

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ, СИМВОЛІВ, ОДИНИЦЬ СКОРОЧЕНЬ .....	6
ВСТУП .....	9
1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ВЕНТИЛЬНИХ РОЗРЯДНИКІВ ТА ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ.....	11
1.1. Захисні пристрої для захисту ізоляції електричних мереж від перенапруг: основні відомості .....	11
1.2. Застосування вентильних розрядників .....	19
1.2.1. Переваги та недоліки вентильних розрядників .....	29
1.3. Застосування обмежувачів перенапруг нелінійних .....	30
1.3.1. Обмежувачі перенапруг нелінійні з іскровим проміжком .....	45
1.3.2. Обмежувачі перенапруг нелінійні без іскрового проміжку .....	53
1.3.3. Переваги та недоліки обмежувачів перенапруг нелінійних .....	60
1.3.4. Заміна вентильних розрядників на обмежувачі перенапруг нелінійні .....	63
1.4. Висновки по розділу 1 .....	65
2. ЗАХИСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ.....	67
2.1. Захисний рівень обмежувачів перенапруг нелінійних .....	67
2.2. Особливості динамічних вольт-амперні характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних.....	68
2.3. Динамічні (частотно-залежні) моделі ОПН .....	71
2.4. Вибір захисного рівня обмежувачів перенапруг нелінійних.....	73
2.5. Висновки по розділу 2 .....	74
3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПН В MICRO-CAP EVALUATION VERSION.....	76
3.1. Модель ОПН в Micro-Cap 11 Evaluation Version. ....	76
3.2. Дослідження впливу відстані між нелінійним обмежувачем перенапруг та об'єкту, що захищається від впливу перенапруг. ....	77
3.2.1. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 1.2/50 мкс. ....	78
3.2.2. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 100/1000 мкс. ....	89

3.2.3. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 250/2500 мкс. ....	101
3.3. Дослідження спрощеної схеми захисту трансформаторної підстанції	113
3.3.1 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії грозового імпульсу напруги 1.2/50 мкс. ....	114
3.3.2 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії комутаційного імпульсу напруги 100/1000 мкс. ....	122
3.3.3 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії комутаційного імпульсу напруги 250/2500 мкс. ....	130
3.4. Схемотехнічне моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг в MICRO-CAP EVALUATION VERSION .....	138
3.4.1. Повна модель ОПН 1992 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version .....	138
3.4.2. Спрощена модель ОПН 1999 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version .....	140
3.4.3. Спрощена модель ОПН 2004 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version .....	142
3.5. Висновки по розділу 3 .....	145
4. СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	146
4.1. Опис ідеї проекту .....	146
4.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	148
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	149
4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту .....	155
4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	157
4.6. Висновки по розділу .....	160
ВИСНОВКИ.....	161
Додаток 1 .....	162
Додаток 2.....	164
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	168

## ВСТУП

У більшості випадків повітряні лінії на металевих опорах оснащені одним або двома заземленими тросами, підвішують вище фазних проводів і приймають на себе основну частину ударів блискавки. Наявність тросів не виключає появу високих потенціалів на фазних проводах за рахунок зворотних перекриттів з опори на фазні дроти, а також удару блискавки в фазний провід. На двоколових опорах зворотне перекриття призводить до замикання між двома ланцюгами і виникненню двухфазного короткого замикання [1], [2]. Огляд основних схем для часткових розрядів приведено в [3]. Аналіз окремих компонентів схем вимірювання ЧР приведено в [4], [5]. Дослідження та схемотехнічне моделювання схеми вимірювання ЧР приведено в [6]. Дослідження ЧР за умови впливу прикладеної напруги різних форм приведено в [7]. Аналіз та порівняння ЧР, що виникають як при напрузі змінного, так і постійного струму, приведено в [8], [9]. Подальший розвиток трьох-ємнісної схеми заміщення часткових розрядів показаний в [10]. Аналіз публікацій [11], [12] показує, що подільники високої напруги можуть бути використані при вимірюванні часткових розрядів у високовольтній ізоляції різного електрообладнання. Огляд сучасних методів аналізу ЧР із широким залученням інформаційних технологій виконаний в [13]. Все електрообладнання має бути перевірене на ЧР в його ізоляції. Це стосується, і обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН). Так, ОПН з найбільшою тривало допустимою робочою напругою 73 кВ і вище не повинні мати рівень ЧР вище 10 пКл. Тому моделювання ОПН важливим. Основних способи схемотехнічного моделювання ОПН приведено в [14], [15], [16]. Різниця різних динамічних моделей ОПН проведено в [17]. Спеціальні питання, або моделювання певних режимів ОПН проведені в [18], [19], [20], [21]. Аналіз впливу індуктивностей з'єднувальних провідників на залишкову напругу ОПН проведено в [22]. Крім відомих негативних впливів, часткові розряди у підвісних ізоляторах можуть бути причиною електричного перекриття гірлянд

підвісних ізоляторів [23]. Доцільність встановлення підвісних ОПН на всіх фазах ділянки, що захищається двоколових ВЛ залежить від грозової інтенсивності в регіоні траси ПЛ, рівня опору заземлення опор, збитків від перекриттів ізоляції, необхідного рівня надійності і т.д. Аналіз впливу величини опору заземлення опор на грозоупорність ВЛ при установці ОПН на опорах[24], [25], так і досвід розробки окремих їх компонентів [26], [27].

## 1. ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ПРИНЦИП ДІЇ ВЕНТИЛЬНИХ РОЗРЯДНИКІВ ТА ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ

### 1.1. Захисні пристрої для захисту ізоляції електричних мереж від перенапруг: основні відомості

Перенапруги - це ненормальний режим роботи в електричних мережах, який полягає в надмірному збільшенні значення напруги вище допустимих значень для ділянки електричної мережі, який є небезпечним для елементів обладнання даної ділянки електричної мережі.

Послуги з ізоляції устаткування електроустановок розрахована на нормальну роботу при певних значеннях напруги, в разі наявності перенапруги, ізоляція приходить в непридатність, що призводить до пошкодження обладнання та становить небезпеку для обслуговуючого персоналу або людей, які знаходяться в безпосередній близькості до елементів електричних мереж.

Перенапруги можуть бути двох видів - природними (зовнішніми) і комутаційними (внутрішніми). Природні перенапруги - це явище атмосферного електрики. Комутаційні перенапруги виникають безпосередньо в електричних мережах, причинами їх прояву можуть бути великі перепади навантаження на лініях електропередачі, ферорезонансні явища, після аварійні режими роботи електричних мереж.



Рисунок.1.1.1

Розрядники та ОПН встановлюються для захисту елементів обладнання на території розподільних пристроїв електроустановок, а також на початку і в кінці ліній електропередачі напругою 6 і 10 кВ, які не обладнані грозозахисним тросом.

Для захисту від природних (зовнішніх) перенапруг на металевих і залізобетонних конструкціях відкритих розподільних пристроїв встановлюють стрижневі громовідводи. На високовольтних лініях напругою 35 кВ і вище застосовують грозозахисний трос (тросовий блискавковідвід), який розташовується у верхній частині опор ліній електропередачі на всій їх протяжності, з'єднуючись з металевими елементами лінійних порталів відкритих розподільчих пристроїв підстанцій. Громовідводи притягують атмосферні заряди на себе, тим самим попереджаючи їх потрапляння на струмопровідні частини електрообладнання електроустановок.

Для забезпечення надійного захисту обладнання електроустановок від можливих перенапруг, розрядники та обмежувачі перенапруг, як і всі елементи обладнання, повинні проходити періодичні ремонти і випробування. Також необхідно відповідно до встановленої періодичністю перевіряти опір і технічний стан заземлюючих контурів розподільних пристроїв.

#### Перенапруги в низьковольтних мережах

Явище перенапруг також характерно і для низьковольтних мереж напругою 220/380 В. Перенапруги в низьковольтних мережах призводять до виходу з ладу не тільки обладнання даних електричних мереж, але і електроприладів, які включені в мережу.

Для захисту від перенапруг в домашній електропроводці використовують реле напруги або стабілізатори напруги, джерела безперебійного живлення, в яких передбачена відповідна функція. Також існують модульні пристрої захисту від імпульсних перенапруг, призначені для установки в домашній розподільний щиток.





Рисунок. 1.1.2

У низьковольтних розподільчих пристроях підприємств, електроустановок, ЛЕП для захисту від перенапруг застосовують спеціальні обмежувачі перенапруг за принципом роботи схожі з високовольтними ОПН.

Причини імпульсних перенапруг.

Для того щоб захиститися від імпульсних перенапруг, потрібно знати причини їх виникнення.

Найбільш небезпечною причиною виникнення імпульсів перенапруги є удари блискавки.

Удари блискавки можуть надавати руйнівний вплив і викликати порушення в роботі електроустановок. Найбільш руйнівними наслідками мають імпульси перенапруги, що виникають в результаті прямого попадання блискавки в об'єкт, що захищається. Амплітуда цих імпульсів може досягати десятків кіловольт. Менш потужним, але таким же небезпечним є удар блискавки на деякому віддаленні від об'єкта, що захищається.

Другою причиною виникнення перенапруги можуть стати процеси перемикань в системі електропостачання, наприклад в таких випадках, як перемикання трансформаторів, електродвигунів або будь-яких

індуктивностей, раптові зміни навантаження, відключення захисних автоматів або роз'єднувачів (в розподільних шафах).

Третя причина перенапруг - нестійкі наведення з невизначеними амплітудами і частотами, які приносяться в мережу електроживлення самим користувачем або його обладнанням. Такі наведення можуть бути наслідком роботи дугових печей, зварювальних апаратів, тиристорних пристроїв і ін.

Пристрої електричних мереж або піддаються впливу, або самі генерують різні види перенапруг. Величина витримує ( $U_{\text{вид}}$ ) комутаційних перенапруг не повинна перевищувати допустимих значень, пов'язаних з рівнем напруги випробування:

$$U_{\text{вид.1}} = \sqrt{2} k_u k_k U_{1\text{мін}}$$

де  $U_{1\text{мін}}$  - однохвилинне випробувальну напругу, кВ;

$k_i$  - коефіцієнт імпульсу, що враховує зміцнення ізоляції при більш короткому імпульсі в порівнянні з випробувальним;

$k_k$  - коефіцієнт кумулятивності, що враховує багаторазову дію перенапруг і можливе старіння ізоляції.

Витримуємий електроустаткуванням рівень грозових перенапруг:

$$U_{\text{вид.2}} = 1,1(U_{\text{гзи}} - U_{\text{н}}),$$

де  $U_{\text{гзи}}$  - випробувальну напругу повного грозового імпульсу, кВ;

$U_{\text{н}}$  - номінальна напруга.

Витримуються внутрішньою ізоляцією трансформаторів і апаратів рівні грозових і комутаційних перенапруг наведені в таблиці 1.1.1. У таблиці 1.1.2 наведено рівень перенапруг, що витримується ізоляцією електричних машин при випуску з заводу.

Таблиця 1.1.1

Вид обладнання	Вид ізоляції	Клас напруги, кВ	$U_{1\text{мін}}$ , кВ	$U_{\text{вид.1}}$ , кВ	$U_{\text{вгі}}$ , кВ	$U_{\text{выд.2}}$ , кВ
Трансформатори	Нормальна	6	25	42,7	60	59,4
		10	35	59,8	80	77,0
		35	85	145,5	200	181,5
	Полегшена	6	16	27,4	-	-
		0	24	41,0	-	-
Апарати	Нормальна	6	32	49,6	57	56,1
		10	42	65,1	75	71,5
		35	75	116,2	185	165,0
	Полегшена	6	16	27,4	-	-
		6*	20*	34,2	40*	37,4
		10	24	41,0	-	-
		0*	28*	47,9	60*	55,0

Таблиця 1.1.2.

Потужність електричної машини, кВт	Номінальна напруга, кВ	Випробувальна напруга, кВ	Допустима напруга, кВ
До 1000	6,0	13,0	18,4
	6,3	13,6	19,2
	10	21,0	29,7
	10,5	22,0	31,0
Понад 1000	6,0	15,0	21,2
	6,3	15,8	22,2
	10	23,0	32,5
	10,5	24,0	33,8

В процесі експлуатації електрична міцність ізоляції знижується відповідно до її виду. В діапазоні довжин фронтів від 5 до 0,2 мкс. значення

витримуємих перенапруг знижується через нерівномірний розподіл напруги уздовж обмотки.

Фактичні перенапруги на електрообладнанні мереж 6-35 кВ можуть значно перевищувати допустимі, якщо не вживати заходів щодо їх обмеження.

Розглянемо причини виникнення та види небезпечних перенапруг в мережах 6-35 кВ.

### Грозові перенапруги

Небезпечні грозові впливи на повітряних і кабельних лініях, підстанціях і рухомому обладнанні виникають при ударах блискавки безпосередньо в дроти і опори ліній, підстанції, розподільних пристроїв (РП), а також при проходженні по лініях електропередачі (ЛЕП) грозових хвиль. Для розподільних пристроїв 6-35 кВ небезпечні перенапруження, індукують на струмопровідних частинах при ударах блискавки в землю або інші об'єкти поблизу ЛЕП і підстанцій.

При ударі блискавки в опору повітряних ліній без троса імпульсна напруга на ізоляції складається з суми складових:

$$U_{imn}(t) = U_r(t) + U_{in.m}(t) + U_{in.e}(t),$$

де  $U_r(t)$  - складова, викликана втратою напруги на опорі заземлення опори;

$U_{in.m}(t)$  - магнітна складова індуктированого напруги, що виникає при протіканні струму по опорі і каналу блискавки;  $U_{in.e}(t)$  - електрична складова напруги.

Імпульсна напруга при ударі блискавки в опору визначається параметрами блискавки, геометричними параметрами ізоляції і величиною опору заземлення. Параметри імпульсу струму при грозовому розряді є випадковою величиною і залежать від швидкості головного розряду і еквівалентного опору каналу блискавки.

Грозові імпульсні напруги в електричних мережах споживача можуть перевищувати значення за рахунок грозових уражень самої мережі, а також за рахунок відображення і заломлення в ній грозових імпульсів.

У мережах 6-35 кВ в середньому за рік виникає близько 30 тимчасових перенапруг.

Грозові перенапруги представляють реальну небезпеку для обладнання мереж практично всіх класів номінальної напруги і, отже, вимагають розробки і впровадження ефективних захисних заходів, однією з яких є застосування спеціальних захисних апаратів - вентильних розрядників (РВ) і обмежувачів перенапруг нелінійних (ОПН).

Захисні властивості РВ і ОПН засновані на нелінійності вольтамперної характеристики їх робочих елементів, що забезпечує помітне зниження опору при підвищеній напрузі і повернення в початковий стан після зниження напруги до нормального робочого. Низька нелінійність вольтамперної характеристики робочих елементів в розрядниках не дозволяла забезпечити одночасно і досить глибоке обмеження перенапруг, і малий струм провідності при впливі робочої напруги, від впливу якого вдалося відбудуватися за рахунок введення послідовно з нелінійним елементом іскрових проміжків. Значно більша нелінійність окісноцинкових опорів (варисторів) обмежувачів перенапруг ОПН дозволила відмовитися від використання в їх конструкції іскрових проміжків, тобто нелінійні елементи ОПН приєднані до мережі протягом всього терміну його служби.

Ідеальний пристрій захисту від перенапруг повинен притиснути напругу системи до нормального значення, коли виникає умова перенапруги. Зазвичай він повинен мати нескінченний опір, який повинен змінюватися саме за умови перенапруги, щоб проводити достатній струм для затиску напруги. Цей перехід повинен відбутися миттєво, не спричиняючи порушення енергосистеми, а сам пристрій має бути несприйнятливим до збоїв,

включаючи перевантаження та велику струмопровідність. Крім того, продуктивність повинна відповідати будь-якому типу перенапруги чи прикладеної напруги - різної форми хвилі, часу підйому та частоти. Сплеск поза захищеною зоною не повинен спричиняти повороту всередині захищеної зони, а удари в межах захищеної зони не повинні спричиняти перемикання всередині або поза захищеною зоною. Практичний захист від перенапруг, як правило, імітує цей ідеал. Таким чином, основна функція розрядника полягає в обмеженні перехідної напруги на деякий нижчий рівень, залежно від характеристик розрядника. Цей рівень можна назвати захисним рівнем. Вона буде дещо вищою за напругу системи та стане важливою при координації ізоляції. Під час роботи розрядники розсіюють енергію і не повинні пошкоджуватися при цьому перехідному сплеску енергії через них.

Повітряні розрядники були найбільш ранніми і вже не користуються популярністю. Зазори стрижня були встановлені поперек трансформаторних втулок та ізоляторів. Після того, як повітряний зазор руйнується в умовах перенапруги, тобто струму блискавок, він відводить дугу від обладнання, яке захищає, але підтримуватиме дугу навіть після розрядки блискавки. Дуга може погаснути при нульовому струмі; однак, через тривалий час спрацьовування, системні реле несправностей із заземленням системи можуть спрацьовувати, що призводить до переривання обслуговування та може бути поставлено під загрозу сама надійність роботи мережі. Електроди, які можуть бути закругленими або загостреними, поперек яких намальована дуга, швидко втрачають міцність. Хоча прості та міцні, зазори стрижня мають серйозні обмеження в застосуванні як захисних пристроїв від перенапруг. Зазори стрижня призначені для витримування 150 відсотків напруги системи в найгірших атмосферних умовах, вологості та відносної щільності повітря.

$$V_{W,60} = \sqrt{2} * 1.5 * V_{TOV}$$

де  $V_{TOV}$ - тимчасова перенапруга в кВ., середня напруга пробою зазору, пов'язане з напругою пробою 60 Гц:

$$V_B = V_{W,60} + 3\sigma = 1.06V_{W,60}$$

Трубчатий розрядник.

Це були наступні розробки в захисті від перенапруг і мали на меті зменшити наступний струм, щоб забезпечити безперервність послуг без експлуатації захисних пристроїв із замиканням на землю. Два зазори повітря, один верхній і один нижній, були встановлені послідовно. Розрив верхнього зазору призводить до пробію нижнього зазору, який має пробку з волокнистого матеріалу для охолодження дуги, так що струм був перерваний при нульовому струмі. Ці розрядники мали обмежений термін експлуатації, оскільки волокнистий матеріал витрачався та мав різні експлуатаційні характеристики, залежно від форми хвилі напруги. Вони більше не використовуються.

## 1.2. Застосування вентильних розрядників

Вентильні розрядники - це, в основному, розрядники з повітряним зазором послідовно з нелінійним резистором з карбіду кремнію. Хоча вони замінені металоксидними розрядниками (ОПН), вони все ще широко використовуються. Характерний пробій повітряного зазору в розряднику регулює початкову напругу, при якій починається дія обмежувача перенапруг.

В процесі експлуатації обладнання підстанцій (ПС) піддається впливу робочої напруги, а також різних видів перенапруг. У разі можливості перевищення допустимої величини і тривалості будь-якого з впливів на обладнання необхідно вжити заходів щодо їх обмеження. До таких заходів належать:

1. установка на ПС спеціальних захисних апаратів (ЗА) - вентильних розрядників (РВ) і нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН). Зазначені апарати призначені для захисту обладнання ПС від грозових і

комутаційних перенапруг, але не від квазістаціонарних (ферорезонансні перенапруги, резонансне зміщення нейтралі);

2. схемно-режимні заходи, спрямовані на зниження тих видів перенапруг, для обмеження яких ОПН і РВ не призначені і які можуть привести до пошкодження обладнання ПС (в тому числі і самих ЗА).

При побудові (або модернізації вже існуючих) схем захисту обладнання ПС від перенапруг за допомогою ОПН і РВ необхідно вирішувати дві основні, тісно пов'язані один з одним завдання: вибір кількості, місць установки і характеристик ЗА, які забезпечать надійний захист основного обладнання ПС; забезпечення надійної роботи самих ЗА.

Необхідно мати на увазі, що вентильні розрядники вже зняті з виробництва, а використовуються в більшості випадків відслужили свій нормативний термін. Тому заміна РВ можлива лише на сучасні ОПН. І при модернізації існуючих схем захисту необхідно вирішувати додаткове завдання по вибору характеристик ОПН, призначених для заміни застарілих РВ.

Про налаштуваннях захисних апаратів і місце їх установки.

Захист високовольтного обладнання ПС від грозових і комутаційних перенапруг здійснюється за допомогою вентильних розрядників і обмежувачів перенапруг.

Для обладнання мереж номінальною напругою 110-220 кВ найбільшу небезпеку становлять грозові перенапруги, для обладнання мереж 330-750 кВ - як грозові, так і комутаційні. Тому в мережах 110-220 кВ вольт-секундні характеристики іскрових проміжків РВ вибиралися так, щоб розрядники типу РВС, РВМ, РВМГ не спрацьовували при впливі комутаційних перенапруг; розрядники для мереж 330-750 кВ (типу РВМК) налаштовувалися на спрацьовування при впливі як грозових, так і комутаційних перенапруг.

Захисні апарати на ПС можуть бути встановлені:



1. в ланцюзі трансформатора, автотрансформатора;
2. у шунтуючого реактора;
3. на шинах розподільного пристрою ПС (наприклад, у шинних вимірювальних трансформаторів напруги);
4. на кінцях приєднаних до ПС ліній.

При захисті ПС від перенапруг однією з потребують вирішення завдань є забезпечення надійності самих захисних апаратів, тобто ОПН і РМ. Іншими словами, характеристики встановлених на підстанціях захисних апаратів повинні бути узгоджені з експлуатаційними впливами на них. Основними характеристиками захисних РВ і ОПН:

1. найбільша робоча напруга апарату;
2. амплітуда імпульсу струму пропускної здатності або питома енергоємність апарату;
3. характеристика «напруга-час»;
4. номінальний розрядний струм грозового імпульсу;
5. ток вибухобезпеки.

Перевищення значень будь-якого з цих впливів може стати причиною пошкодження апарату. Навіть в разі, якщо захисний апарат і не вийде з ладу безпосередньо після такого впливу, його ресурс буде знижений щодо розрахункового та відповідно строк служби скоротиться.

Іскрові проміжки вентильних розрядників відокремлюють нелінійні резистори РВ від мережі. При впливі на вентильний розрядник перенапруги, що перевищує пробивну напругу його іскрових проміжків, відбувається їх пробою, і нелінійний резистор приєднується до мережі, забезпечуючи зниження перенапруги. Після проходження через розрядник імпульсного струму, викликаного перенапруженням, через нелінійний резистор протікає

так званий «супроводжуючий» струм, обумовлений впливом на РВ робочої напруги мережі. При переході супроводжуючого струму через нуль дуга в іскрових проміжках гасне і розрядник приходить в початковий стан.

Значно більша нелінійність окисно-цинкових опорів (варисторів) обмежувачів перенапруг дозволила відмовитися від використання в їх конструкції іскрових проміжків.

Нелінійні елементи обмежувача перенапруг приєднані до мережі протягом всього терміну його служби. При впливі робочої напруги через ОПН протікає струм порядку декількох міліампер, який носить в основному ємнісний характер. При перенапруженнях опір ОПН істотно падає, що призводить до різкого збільшення активної складової струму через апарат. У підсумку в варисторах ОПН розсіюється надлишкова енергія перенапруг, що виникають в мережі, що захищається.

В даний час більшість вентильних розрядників експлуатується за межами нормативного терміну служби, що становить 20 років. Внаслідок природного старіння використаних в конструкції матеріалів, як показують нечисленні дослідження, захисні властивості РВ до кінця нормативного терміну служби помітно змінюються навіть у тих розрядників, число спрацьовувань яких не перевищує нормоване заводом-виробником. При цьому в більшості випадків пробивна напруга іскрових проміжків постарених розрядників стає помітно нижче, а залишається напруга на нелінійному резисторі вище.

Так, дослідження розрядників типу РВС і РВМГ 110-330 кВ, показали:

1. залишається напруга РВ по мірі їх старіння зростає, як правило, на 7-10%;
2. пробивна напруга РВ знижується до величин, на 15-20% менших нижньої межі допустимих значень;

3. знижений пробивна напруга спостерігалось у 20% обстежених розрядників типу РВС і майже у 75% обстежених розрядників типу РВМГ.

Зниження пробивної напруги іскрових проміжків розрядників типу РВС і РВМГ може бути причиною їх спрацьовувань від комутаційних перенапруг, що призводить до подальшого вибухового руйнування розрядників при проходженні супроводжуючого струму. Таким чином, знаходяться в експлуатації РВ часто не тільки не виконують своїх захисних функцій, але і самі стають потенційними джерелами можливих аварій.

У 90-ті роки через високу трудомісткість виробництва і настройки іскрових проміжків для РВ вітчизняні підприємства повністю припинили випуск вентильних розрядників, але при цьому істотно розширили номенклатуру ОПН.

Блоки карбіду кремнію мають нелінійну характеристику, тому їх опір зменшується зі збільшенням струму. На рис. 1.2.1 показано схематичне зображення розрядника. Кристали карбіду кремнію з'єднані з інертним матеріалом шляхом спікання в печі при температурі 1000 ° С.

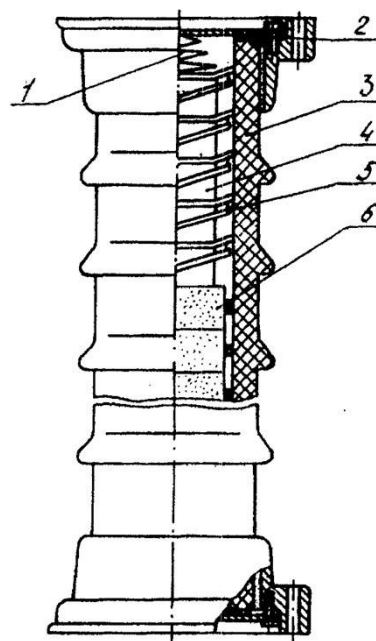


Рисунок 1.2.1

Зовнішня поверхня клапанного блоку має епоксидний або керамічний комір для запобігання розрядів при проведенні сильних струмів. Вольт-амперна характеристика вентильного розрядника з карбіду кремнію контролюється зернами карбіду кремнію в блоці. Нагрівання відбувається за рахунок контактних точок всередині блоку, і, таким чином, існує чітка залежність між величиною струму, формою хвилі та температурою в точці контакту.

Карбід кремнію має від'ємний коефіцієнт опору, який зменшується зі збільшенням температури та збільшенням струму. Характеристики розроблені так, щоб забезпечувати обмеження напруги за допомогою хвильових форм струму блискавки, зберігаючи струми потоку потужності низькими, які перериваються повітряним зазором.

Блоки мають невелику здатність до перевантаження і можуть бути зруйновані, якщо вони піддаються розряду енергії, що перевищує їх проектні можливості.

Вольт-амперні характеристики вимірюються за допомогою стандартної форми імпульсної хвилі 8/20 мс для пікових величин 1,5, 3, 5, 10 та 20 кА.

Існує розрядників, кожен з яких оцінюється в межах від 1 до 1,5 кВ. Кожен зазор може складатися з контурної латуні, міді або пластини з нержавіючої сталі, відокремлених від сусідньої плити керамічним прокладкою. Використання модульних прогалин дозволяє зробити різні рейтинги шляхом складання різної кількості прогалин, так що:

1. Збільшується здатність переривати струм потоку живлення.
2. Отримано збільшення загального падіння напруги дуги, тим самим підвищуючи здатність струму, що перебиває струм живлення.
3. Вдосконалено реакцію на круті хвилі.

4. Відповідь на різні форми хвилі напруги можна змінювати за допомогою контролю напруги між окремими проміжками.

Оскільки нагрівання диктується струмом, короткочасні сплески створюють більш високі перепади напруги, ніж тривалі сплески. Виробники публікують дані щодо можливостей комутації перенапруг.

Рівень захисту від перенапруг не стандартизований, і виробники зобов'язані публікувати максимальні значення для кожної конструкції; ці дані потрібні для правильного застосування.

Розрядник продовжує вести до тих пір, поки дуга в повітряному зазорі не погасне при нульовому струмі. Через нелінійність струм через розрядник перенапруг несинусоїдальний. Практично конструкція зазорів є більш складною, ніж описана раніше.

Розрив у попередній установці Для захисту від перенапруг бажано мати розрив зазору на фіксованому рівні напруги незалежно від форми хвилі напруги. Однак зазор реагує на миттєве підвищення напруги і напруги різними темпами, залежно від максимального рівня сплеску та швидкості його підйому. Затримка статистичного часу - це час, який витрачають початкові електрони для початку лавинного процесу, можна звести до мінімуму, включивши перед основним зазором дуги попередній іонізаційний зазор. Менший зазор поміщається в ланцюг і поєднується з ним великим ємнісним чи резистивним опором.

Компоненти оцінювання У разі навіть незначного нерівномірного розподілу напруги по розривам, розриви з більш високою напругою, що подається по ньому, спочатку виходять з ладу, і пробій буде каскадною протягом всієї збірки. Отже, розрядники оснащені якоюсь формою навмисних градаційних компонентів, тобто градуючими резисторами. Це дає короткий опис проектувальних особливостей; характеристики зменшення перенапруг представляють більший інтерес.

Номинальна напруга. Вентильний розрядник повинен витримувати номінальну напругу протягом 24 хв, розряджаючи від 5 до 10 кА стандартних струмів блискавки з інтервалом 1 хв. Успішна робота означає, що струм струму після кожного розряду повинен бути перерваний. Отже, ця номінальна напруга визначається випробуваннями робочого циклу. Нормативи публікують номінальні напруги. Розрядник не зможе постійно протистояти при номінальній напрузі. Вибір номінальної напруги розрядника для конкретного застосування описано далі.

Здатність протистояти перенапругам вимагає, щоб не було пробоїв через зазори розрядника, коли не має перенапруг. Під час його проведення розрядник повинен бути в змозі протистояти підвищеним напруженням і мати можливість переривати вищі потужності, що сліднують за струмами. Розрядники перенапруг класу розподілу не мають чітко визначених можливостей перенапруги, тоді як розрядники перенапруг середнього класу та станції мають кращі можливості протистояння перенапруги. Отже, продуктивність розрядників різних класів розподілу може бути виражена лише через збільшення ймовірності виходу з ладу з більшими перенапругами.

Напруга розряду від імпульсу блискавки. Фронт імпульса хвилі випробовується стандартною хвилею  $1,2 \times 50$  мс з піковою величиною, вибраною для отримання часу підйому в 25 кВ / мс для кожні 3 кВ напруги розрядника; тобто розрядник напругою 24 кВ повинен бути випробуваний на 200 кВ / мс, пік імпульсного тесту - 225 кВ. Прикладається десять імпульсів, по п'ять від кожної полярності, і максимальна напруга розряду приймається за опубліковане значення.

Ефективність розряду блискавкозахисту. Розряд блискавки взаємодіє із системою, і величина та форма струму розряду можуть змінюватись. Випробування визначають здатність розрядника працювати при стандартних напругах. Форма випробувальної хвилі струму блискавки становить  $8 \times 20$  мс.

Характеристики струму розрядної напруги отримують для струмів 1,5-, 3,0-, 5,0-, 10,0-, 20- та 40-кА.

Контроль величини струму на короткий час дії. Два імпульси струму подаються на розрядник або секцію, що захищається від напруги. Величина імпульсу становить 10 кА для розрядників класу розподілу, а 65 кА - для проміжних і станційних розрядників, використовуючи хвилю 4/10 мс, з допуском від 0 до 50 відсотків для розміщення характеристик випробувального обладнання. Випробувальний зразок повинен витримувати ці імпульси без пошкодження та значного погіршення.

Комутаційні показники розрядних перенапруг. Комутаційні перенапруги триваліші, тому можуть містити більше енергії, ніж удари блискавки. Розрядники перенапруг зазвичай не піддаються комутаційним перенапругам, а отже, їхні можливості перемикання перемикачів не визначені. Крім того, напруга перемикачів перемикачів перемикачів не визначено для проміжних і перемикачів напруги класу станції напругою менше 60 кВ.

SiC розрядники(PV) складаються із декількох іскрових зазорів або без блоків нелінійних резисторів, які виступають обмежувачами струму. Блок, що обмежує струм, має нелінійні характеристики опору. Нелінійні резистори побудовані з порошкоподібного SiC, змішаного із зв'язуючим матеріалом, формований у круговий диск та запечений. Діаметр диска залежить від його енергетичної характеристики, а товщина - від його напруги. ВАХ для нелінійного клапанного блоку SiC має цикл гістерезису, опір вищий під час висхідної частини імпульсного струму, ніж під час хвоста поточної хвилі, Нелінійні властивості обумовлені стійкісно-температурними властивостями стику між кристалами SiC.

Функція повітряного зазору полягає в ізоляції блоку, що обмежує струм, від напруги при нормальних робочих умовах. Без зазору струм витоку частоти потужності постійно би протікав через клапанний блок, що перегрівало б блок,

і в кінцевому підсумку може призвести до теплового відходу. Розряд спалахує, якщо величина прикладеної напруги перевищує заданий рівень. Напруга розбиття залежить від форми хвилі напруги: чим крутіше піднімається напруга, тим вище напруга спалювання. Після того, як енергія в перехідній напрузі буде розсіяна, струм, що подається, проходить через елементи клапана. Відносно високий струм буде продовжуватись протікати через розрядник, після розряду і після перенапруга знизитися, якщо напруга живлення по всьому розрядника досить висока, оскільки дуга зазору має низький опір і струм визначається насамперед вольт-амперною характеристикою блоку SiC. Падіння напруги на розрядниках зростає із струмом розряду, що проходить через них. Однак через нелінійність блоків клапанів потік струму буде настільки низьким, що дуга через елементи зазору серії стане нестабільною і загасне, тим самим ізолюючи джерело напруги від розрядника.

Для забезпечення угасання дуги та її повторного ущільнення передбачений механізм управління дугою. Важливим ефектом цього контролю є те, що для швидких перехідних процесів майже вся напруга проходить через блок, що обмежує струм.

#### Про відновлення РВ.

Відсутність нових розрядників, необхідних для заміни що вийшли з ладу, призвело до того, що в ряді експлуатуючих організацій для складання придатних для подальшої роботи захисних апаратів робляться спроби відібрати з раніше забракованих при профілактичних випробуваннях РВ наявні справні елементи.

При виробництві таких ремонтних робіт слід мати на увазі, що для контролю вольт-секундних характеристик «відновлених» розрядників необхідний генератор лінійно наростаючої імпульсної напруги, що



забезпечує відповідно до вимог ГОСТ 16357 можливість контролю пробивних напруг в широкому діапазоні предразрядних часів.

Досвід випробувань РВ показує, що контроль за однієї-двох точках недостатній, так як зустрічаються РВ з провалами в вольт-секундної характеристиці при різних предразрядних часи з нормованого в ГОСТ діапазону. Крім того, випробування повинні проводитися не на окремих елементах, а на повністю зібраному РВ. Оскільки задовольняє перерахованим вимогам випробувального устаткування у експлуатуючих організацій немає, то проконтролювати відповідність «відремонтованого» РВ нормативним вимогам не представляється можливим, а сам РВ і раніше залишається можливою причиною аварії в мережі.

Проведення повного циклу випробувань РВ можливо лише в спеціалізованих високовольтних лабораторіях, оснащених необхідним високовольтним обладнанням і вимірювальною апаратурою.

#### 1.2.1. Переваги та недоліки вентильних розрядників

Переваги вентильних розрядників:

1. Безшумність спрацьовування.
2. Відсутність викидів газу або полум'я.

Основними недоліками вентильних розрядників є:

1. Обмежена кількість спрацьовувань (зазвичай до 20)
2. Велика маса
3. Крихкість
4. Великі розміри
5. Низька нелінійність вольт-амперної характеристики

6. Великий розкид напруг спрацьовування іскрових проміжків
7. Зниження напруги спрацьовування при зволоженні і забрудненні покриття (призводить до спрацьовування при номінальній напрузі)
8. Складність конструкції, підбору параметрів елементів і настройки пробивної напруги іскрового проміжку
9. Зміна характеристик внаслідок вигорання іскрового проміжку після багаторазових спрацьовувань
10. Великий розкид параметрів якості з огляду на застарілої технології виробництва
11. Частий вихід з ладу через негерметичність покриття
12. Дуга може погаснути при нульовому струмі; однак, через тривалий час спрацьовування, системні реле несправностей із заземленням системи можуть спрацьовувати, що призводить до переривання обслуговування та може бути поставлено під загрозу сама надійність роботи мережі. Електроди, які можуть бути закругленими або загостреними, поперек яких намальована дуга, швидко втрачають міцність.

### 1.3. Застосування обмежувачів перенапруг нелінійних

Доцільність установки підвісних ОПН на всіх фазах ділянки, що захищається двоколових ВЛ залежить від грозової інтенсивності в регіоні траси ПЛ, рівня опору заземлення опор, збитків від перекриттів ізоляції, необхідного рівня надійності і т.д. Аналіз впливу величини опору заземлення опор на грозоупорність ВЛ при установці ОПН на опорах дозволяє зробити наступні висновки:

при опорах заземлення, що не перевищують 10 Ом, удари блискавки в опору або в трос не призводять до виникнення зворотних перекриттів, що

прорвалися ж крізь тросову захист блискавки приведуть до неминучого перекриття лінійної ізоляції. Тому, виходячи з того, що основні удари блискавок при проривах тросової захисту припадають на верхні фази, при таких величинах опору заземлення доцільна установка ОПН лише на верхніх фазах;

при опорах заземлення опор більше 10-20 Ом удари блискавки в трос або в опору приведуть до виникнення зворотних перекриттів з опори на дроти нижніх фаз. Установка додаткових ОПН на нижніх фазах в цих розрахункових випадках дозволить зменшити ймовірність виникнення зворотних перекриттів.

Так, для двоколових ВЛ 110-330 кВ при опорах заземлення опор, рівних 30 Ом і більше 40 Ом, кількість встановлюваних ОПН на опорі необхідно довести до чотирьох і шести відповідно. Слід, однак, відзначити, що при значеннях опорів заземлення 30-40 Ом для захисту від ударів блискавок в опору або в трос поблизу опори однієї дволанцюговий ВЛ потрібно меншу кількість апаратів, ніж при захисті двох одноланцюгових ПЛ.

На величину необхідної енергоємності ОПН впливає величина опору заземлення опор. Розрахунки показали, що для оцінки максимальних струмових навантажень підвісних ОПН можна моделювати лише один проліт ВЛ. Це пояснюється тим, що в вузлах пошкодженого прольоту при спрацьовуванні ОПН зменшується напруга практично до значення залишається напруги на ОПН. В цьому випадку хвиля, що рухається в бік наступного вузла, без урахування зворотних набігаючих хвиль складе  $\sim 2U_{опн}$ . Коронування проводів, а також відображення хвиль від сусідніх опор ще більше знижують амплітуду хвилі, збільшують тривалість її фронту і, як наслідок, знижують енергетичні навантаження ОПН. Очевидно, що струмові навантаження ОПН сусідніх вузлів істотно менше, ніж у вузлах, що безпосередньо прилягають до прольоту, ураженого блискавкою.

Джерело блискавки моделювався у вигляді джерела струму з нульовою похідною струму в початковий момент часу, при моделюванні гострої ниркової недостатності були враховані динамічні властивості його вольт-амперних характеристик.

Струмові і енергетичні навантаження підвісних ОПН, встановлених на верхніх і нижніх фазах, при ударі блискавки в фазний провід і в опору або в трос поблизу опори. При ударах блискавки в провід найбільші енергетичні навантаження відчують ОПН, встановлені на верхніх фазах. При цьому максимальна енергія, що поглинається буде при найменшому з розглянутих опорів заземлення (10 Ом). При збільшенні опору заземлення струм, що протікає через ОПН, зменшується і, отже, зменшуються енергетичні впливи, що надаються на апарати. При опорах заземлення більше 100 Ом удари блискавки в трос або в опору будуть супроводжуватися великими струмами і енергіями. Так, при опорі заземлення 1000 Ом удар блискавки в опору ПЛ 330 кВ призведе до того, що через ОПН потече струм з амплітудою 24,9 кА,

При ударах блискавки в опору або в трос поблизу опори апарати, встановлені на нижніх фазах, відчують великі енергетичні впливи, ніж при ударах блискавки в провід. Отже, визначальним грозовим впливом при виборі апаратів, що встановлюються на нижніх фазах, будуть удари блискавки в опору або в трос поблизу опори.

### Принципи встановлення ОПН

Таким чином, в залежності від величини опору заземлення, грозової активності, рівня ізоляції ПЛ, необхідного рівня надійності ПЛ і т.д. можна запропонувати різні рішення по установці ОПН на опорах. Основні ж принципи установки можна сформулювати наступним чином:

для захисту фаз ПЛ від перенапруг, викликаних ударами блискавок в опору або в трос поблизу опори, встановлюється необхідну кількість ОПН з малою пропускну здатністю;

для захисту фаз ПЛ від перенапруг, викликаних ударами блискавок в фазні дроти, на верхніх фазах встановлюються ОПН з великою пропускнуою здатністю;

для економічно доцільною надійного захисту ПЛ від перенапруг, викликаних будь-якими проявами грозової діяльності, на опорах доцільно встановлювати ОПН як з великою, так і з малою пропускнуою здатністю;

проектування грозозахисту двоколових ВЛ за допомогою підвісних ОПН необхідно проводити при конкретній прив'язки до об'єкта.

Підвісні ОПН монтуються на опорах ПЛ. При цьому вони не повинні спрацьовувати в разі комутаційних перенапруг, що супроводжують експлуатацію лінії (від таких перенапруг захищають ОПН, встановлені на підстанціях).

Вимоги до струмовим і енергетичними характеристиками підвісних ОПН залежать від їх розташування на опорах ПЛ: на кожній опорі або через кілька опор, на всіх фазах або тільки на тих, які найбільш часто вражаються блискавкою і т. Д.

Підвісні ОПН можна приєднувати до проводів ПЛ двома способами: з іскровим проміжком і без нього. Слід зазначити, що кожен спосіб приєднання підвісного обмежувача до фазним проводам має свої переваги і недоліки.

До основних переваг іскрового приєднання можна віднести відсутність постійно протікає струму в нормальному експлуатаційному режимі. Недоліком цього типу захисту є досить складна координація пробивних напруг відкритих іскрових проміжків з розрядними напруженнями захищається лінійної ізоляції.

Спосіб приєднання захисних апаратів до проводів повітряної лінії несуттєво позначається на їх струмових навантаженнях. При виборі способу приєднання в першу чергу повинні враховуватися різні зовнішні чинники:

забруднення ізоляторів і обмежувачів перенапруг, можливість тривалого впливу підвищеної напруги промислової частоти і ін.

Захисні властивості вентильних розрядників (РВ) і нелінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) засновані на нелінійності вольтамперної характеристики їх робочих елементів, що забезпечує помітне зниження опору при підвищеній напрузі і повернення в початковий стан після зниження напруги до нормального робочого. Низька нелінійність вольтамперної характеристики робочих елементів в розрядниках не дозволяла забезпечити одночасно і досить глибоке обмеження перенапруг, і малий струм провідності при впливі робочої напруги, від впливу якого вдалося відбудуватися за рахунок введення послідовно з нелінійним елементом іскрових проміжків.



Рис. 1.3.1 Фотографія варистора, пошкодженого внаслідок прожога

Значно більша нелінійність окисно-цинкових опорів (варисторів) ОПН дозволила відмовитися від використання в їх конструкції іскрових проміжків, тобто нелінійні елементи ОПН приєднані до мережі протягом всього терміну його служби. Це призвело до того, що сучасні ОПН, на відміну від розрядників, виявилися вельми чутливими до так званих квазістаціонарним перенапругам, які можуть призводити до перегріву варисторів і їх подальшого пропалу (рис.1.3.1). Квазістаціонарні перенапруги (від декількох секунд до десятків хвилин) можуть виникати через різні причини, які розглянуті далі, але, як правило, є наслідком зміни схеми мережі (планові і аварійні комутації трансформаторів або повітряних ліній).

У разі розгерметизації ОПН (проникнення вологи) характер пошкодження варисторів дещо інший: відбувається перекриття стовпа варисторів по поверхні, як правило, під робочою напругою, тобто без попереднього зміни схеми і режиму мережі.

В даний час існує цілий ряд фірм, які виробляють ОПН. Накопичений досвід і новітні конструкторські рішення дозволили провідним з них практично виключити шлюб при виготовленні ОПН, а також можливість розгерметизації ОПН в експлуатації. Однак, незважаючи на високий рівень виробництва, досвід експлуатації мереж 110-220 кВ свідчить про трапляються пошкодження ОПН. З огляду на це, важливо звернути увагу проектних та експлуатуючих організацій на те, що пошкодження ОПН 110-220 кВ в більшості випадків відбуваються не з вини виробника ОПН, а через що мають місце в мережах квазістаціонарних перенапруг.

Квазістаціонарні перенапруги можуть спостерігатися як на промисловій частоті, так і на вищих і нижчих гармоніках. Здатність ОПН витримувати підвищену напругу промислової частоти визначається його характеристикою «напруга-час».

У відносних одиницях  $U_{HPO}$  характеристики «напруга-час» ОПН у різних фірм близькі один одному, як і вольтамперні характеристики. Тому параметром, що визначає багато властивостей ОПН, є його найбільша робоча напруга  $U_{HPO}$ . При виборі ОПН значення  $U_{HPO}$  знизу обмежена вимогами надійної роботи ОПН при впливі на нього робочої напруги і квазістаціонарних перенапруг, а зверху - вимогами захисту обладнання від грозових і комутаційних перенапруг.

Найбільша робоча напруга ОПН, що забезпечує його безаварійну роботу при впливі робочої напруги, необхідно вибирати з умови:

$$U_{HPO} \geq \frac{K_{\Pi} * U_{HP}}{K_{OPH}(T)}$$

де  $U_{НР}$  - найбільша робоча напруга мережі (фазне значення).

Нехай в мережі протягом часу  $T$  існують квазістаціонарних перенапруги кратності КП, тобто на встановлені в мережі ОПН впливає напруга  $До П \cdot U_{НР}$ . Тоді найбільша робоча напруга ОПН, що забезпечує його безаварійну роботу при квазістаціонарних перенапруженнях, необхідно вибирати з умови:

Як видно, для вірного вибору  $U_{НРО}$ , по крайній мере, необхідно знати можливі кратності квазістаціонарних перенапруг  $До П$  в місці передбачуваної установки ОПН в мережі і тривалість їх існування  $T$ .

У мережі 110-220 кВ повинні виконуватися з ефективно заземленою нейтраллю. У таких мережах за час існування перенапруг вважається рівним часу дії основної (або резервної) релейного захисту та приймається не більше декількох секунд. Тоді на основі даних і з урахуванням інших факторів (поправка на нерівномірність розподілу напруги уздовж ОПН, облік можливості існування в мережевій напрузі вищих гармонік), як правило, приймають:

$$U_{НР} = (1,0 \div 1,05)U_{НР}$$

Умова вибору ОПН прийнято типовим в проектних організаціях і використовується без ретельного аналізу конкретної схемно-режимної ситуації, в яку потрапляє ОПН. Разом з тим специфіка електричних мереж країн колишнього СРСР така, що:

експлуатується велика кількість двухтрансформаторних підстанцій; нейтраль одного з трансформаторів, як правило, розземлена; вимикачі на боці 110-220 кВ трансформаторів в більшості випадків відсутні;

такі підстанції (тупикові, підключених до цих відгалужень, транзитні) в ряді випадків харчуються по довгих ПЛ 110-220 кВ, тобто електрично віддалені від центрів живлення, напруга на шинах яких «незмінно».



З огляду на це, а також досвід експлуатації ОПН і результати розрахунків перенапруг, можна стверджувати, що виконання умови (3) не гарантує надійну роботу ОПН 110-220 кВ у разі виникнення в мережі квазістаціонарних перенапруг, так як:

при аварійних відключеннях ВЛ або силових трансформаторів (відключення трансформатора із заземленою нейтраллю) в мережах 110-220 кВ можуть виділятися ділянки мережі з ізольованою нейтраллю, що є порушенням вимог ПУЕ; час існування таких режимів визначається тим, як швидко обслуговуючий персонал заземлені нейтраль трансформатора, тобто може становити десятки хвилин;

в ряді випадків в мережах 110-220 кВ виробляються комутації ВЛ 110-220 кВ в блоці з силовими трансформаторами 110-220 кВ, які не мають вимикачів на стороні вищої напруги; це може викликати так званий перехідний ферорезонансу, супроводжуваний квазістаціонарними перенапруженнями значною кратності і тривалості існування.

Для забезпечення надійної роботи ОПН 110-220 кВ рекомендується вживання заходів по зниженню квазістаціонарних перенапруг.

Однією їх схем, в яких можливе виникнення небезпечних для ОПН квазістаціонарних перенапруг, є так звана блокова (полублочная) схема. Подібна схема досить поширена при харчуванні тупикових і підключених до цих відгалужень підстанцій 110 (220) кВ.

В експлуатації перед плановими комутаціями блоку ВЛ-Т рекомендується попередньо заземлювати нейтраль трансформатора, приєднаного до ПЛ. Однак велика кількість аварійних ситуацій виникає при комутаціях ВЛ 110 (220) кВ без відповідної підготовки схеми, тобто коли нейтраль трансформатора на момент комутації виявляється розземленою.

Домовимося живитися з боку 110 кВ блок ВЛ-Т, в якому трансформатор 110/10 кВ ненавантажена, називати холостим. У разі неповнофазного

включення блоку ВЛ-Т на мережу 110 кВ спрощена розрахункова схема для визначення напруги на відключених фазах приведена на рис. 4, а, б. Ферорезонансні перенапруги в цих схемах виникають в тому випадку, коли під впливом напруги  $E_{\text{ЕКВ}}$  виявиться коло, в якій послідовно з'єднані ємність і нелінійна індуктивність. В такому колі висока ймовірність виникнення небезпечних ферорезонансним перенапруг на відключених фазах.

Проведені дослідження показують, що при неповнофазних режимах харчування блоку ВЛ-Т з розземленою нейтраллю небезпечні ферорезонансні перенапруги на відключених фазах можуть виникати в широкому діапазоні довжин ПЛ і потужностей силових трансформаторів. Однак на можливість виникнення ферорезонансу і кратності перенапруг при ньому істотно впливає навантаження трансформатора: вже при активному навантаженні трансформатора, яке відповідає 10% його номінальної потужності, ферорезонансні перенапруги не виникають.

У силових трансформаторів в блокової передачі ВЛ-Т встановлено захисні апарати (розрядники або ОПН), призначені для обмеження грозових перенапруг. Після заміни вентильних розрядників на ОПН ферорезонансні перенапруги в разі їх виникнення будуть впливати на ОПН відключених фаз. Розрахунки процесів в разі ненагруженого трансформатора показують, що, наприклад, за 1 секунду неповнофазного режиму, в ОПН виділиться енергія 400 кДж, а в умовах - 700 кДж, тобто близько 5,2 і 9,0 кДж / кВ відповідно (приведено до  $U_{\text{НРО}} = 77$  кВ).

У ряді випадків ОПН 110-220 кВ виходять з ладу внаслідок теплового пробою, що супроводжується прожогом варисторів, який виникає через нерозрахованих квазістаціонарних перенапруг, тобто з незалежних від виробника ОПН причин. З огляду на це, проектним і експлуатуючим організаціям при заміні вентильних розрядників на ОПН рекомендується звертати увагу на можливість виникнення квазістаціонарних перенапруг в місцях установки ОПН і приймати такі заходи для їх зниження:

Для знову споруджуваних підстанцій відмовитися від застосування блокових схем, тобто схем без вимикачів на стороні вищої напруги трансформаторів 110-220 кВ.

На уже введених в дію і експлуатуються підстанціях замінити у трансформаторів 110-220 кВ комплекти «короткозамикачем-відділювач» на вимикачі.

По можливості (там, де це допустимо за умовами роботи релейного захисту) заземлювати нейтралі силових трансформаторів 110-220 кВ.

У мережах, що містять трансформатори 110-220 кВ з розземленою нейтраллю:

встановлювати ОПН 110-220 кВ, найбільша робоча напруга яких, принаймні, на 10% вище, ніж найбільша робоча напруга мережі;

звертати особливу увагу на можливість виділення ділянки мережі з ізолюваною нейтраллю (особливо в схемах електропостачання тягових підстанцій); для виключення можливості тривалого існування в мережі такої ділянки рекомендується, зокрема, замість ручного заземлення нейтралі персоналом забезпечити автоматичне заземлення нейтралі вимикачем або роз'єднувачем з автоматичним приводом.

Вивести на щит оперативного пульта управління індикацію не тільки лінійної напруги мережі (збірних шин, ВЛ), але і напруження всіх трьох фаз щодо землі, так як в експлуатації ОПН знаходиться під впливом фазної напруги, яке з урахуванням можливої несиметрії мережі (природною або аварійної) не може бути визначено через лінійну напругу.

У мережах з глухим заземленням нейтралі на підстанціях.

Найбільше тривало допустима напруга на апараті ( $U_{нро}$ ) має перевищувати найбільшу робочу фазна напруга мережі. У разі ж, якщо

протягом досить тривалого часу напруга в місці встановлення ОПН перевищує найбільша робоча напруга, необхідно, щоб виконувалася умова:

$U_{нро} = k_{унр}$ , де  $k > 1$ . В якості розрахункових впливів при установці ОПН на шинах або на трансформаторах, що не комутованих разом з ПЛ, повинні прийматися стаціонарні режими при несиметричному КЗ на шинах підстанції. При установці ОПН на підстанції за лінійним вимикачем (на лінії) або на шунтуючих реакторі, в якості розрахункових комутацій слід приймати включення ненавантаженої ВЛ в циклі АПВ з урахуванням розкиду в дії полюсів вимикача або в циклі ОАПВ. У ряді схем слід враховувати також комутацію одностороннього вимкнення ПЛ при дії автоматики збільшення асинхронного ходу.

Всі ці розрахунки в даний час доцільно проводити за допомогою відповідних програм, в тому числі широко використовується у світовій практиці дослідження електромагнітних перехідних процесів в електричних мережах програми ЕМТР (АТР). При проведенні розрахунків необхідно реєструвати як максимуми струмів в ОПН, так і питому енергію, що поглинається в апаратах протягом перехідного процесу.

На опорах ПЛ. ЇОстаннім часом розглядається можливість підвищення надійності експлуатації лінійної ізоляції шляхом установки захисних апаратів типу ОПН на опорах ПЛ.

Ефективність цього заходу, зокрема, підтверджується досвідом експлуатації підвісних ОПН в електричних мережах Японії. Так, на двоколових ВЛ, де ОПН встановлені на кожній фазі, двоколових пошкоджень не спостерігалось, одноланцюгові пошкодження спостерігалися приблизно в 60% випадків, а в 40% випадків пошкодження лінійної ізоляції ПЛ були відсутні. На ПЛ ж, не оснащених підвісними ОПН, в 60% випадків спостерігалися дволанцюгові пошкодження, в інших випадках - одноланцюгові пошкодження.

Можливими об'єктами такого захисту лінійної ізоляції від грозових перенапруг можуть бути високі перехідні прольоти через водоймища та інші перешкоди на рельєфі траси ПЛ, ділянки ПЛ з ослабленою ізоляцією, Дволанцюгова електропередачі з вертикальною підвіскою проводів, ділянки траси ПЛ, що проходить через райони з локальної підвищеної вірогідністю ураження блискавки, а також в ожеледних районах, де підвіска тросів недоцільна. При розробці підвісних апаратів повинні враховуватися такі основні обставини:

апарати не повинні спрацьовувати при комутаційних перенапруженні, супроводжуючих експлуатацію лінії (захист від перенапруг цього виду покладається на апарати, встановлені на підстанціях);

вимоги до струмовим і енергетичними характеристиками апаратів залежать від варіанту їх розташування на опорах ПЛ (на кожній опорі або через кілька опор, на всіх фазах ВЛ або лише на тих фазах, які найбільш часто вражаються блискавкою, і т.д.);

спосіб приєднання ОПН до проводів ПЛ - безіскрової або через іскровий проміжок. Обидва способи приєднання підвісного обмежувача до фазним проводам мають як переваги, так і недоліки. До основних переваг іскрового приєднання можна віднести відсутність постійно протікає струму в нормальному експлуатаційному режимі. Недоліком цього типу захисту є досить складна координація пробивних напруг відкритих іскрових проміжків з розрядними напруженнями захищається лінійної ізоляції. При виборі способу приєднання апарату до проводу насамперед повинні враховуватися всякого роду зовнішні чинники: забруднення ізоляторів і ОПН, можливість тривалого впливу підвищеної напруги промислової частоти і ін.

Розстановка ОПН на фазних проводах ВЛ залежить від конструкції лінії: на двоколових ВЛ часто можна встановлювати апарати лише на верхніх фазах, на ВЛ одинланцюговому виконання з горизонтальним розташуванням фазних

проводів - лише на крайніх фазах. Оскільки визначальними впливами є грозові хвилі, то при оцінці струмових і енергетичних впливів на підвісні ОПН слід враховувати орієнтування каналу лідера блискавки. Так, на опорах стандартної конструкції ПЛ 500 кВ амплітуда хвилі струму блискавки, ймовірність перевищення якої складає 0,05, при неврахування орієнтування складає 84 кА, а при її обліку - 45-50 кА. Ймовірності прориву блискавки на дроти цієї ПЛ становлять відповідно 0,87 і 0,55.

Дослідження показали, що при встановленні вимог до ОПН, розташованим на опорах ПЛ 330-1150 кВ з опором заземлення, що не перевищує 10 Ом, слід розглядати лише хвилі, що виникають при прямому ударі блискавки в провід ПЛ. Розрахунковими випадками для ВЛ 110-220 кВ є як прямий удар в провід при прориві блискавки крізь тросову захист, так і удар блискавки в опору або в трос поблизу від опори. У разі ж підвищених опорів заземлення опор (більше 10 Ом) для всіх класів ВЛ необхідно враховувати удари блискавки як в опори, так і в фазні дроти.

На струмові впливу при грозових перенапруженнях спосіб приєднання ОПН до проводу впливає несуттєво. Енергія ж, що поглинається варисторами ОПН при безіскрова приєднання, виявляється дещо менше, ніж при іскровому приєднання ОПН до проводу. Різниця в енергії, що поглинається збільшується з підвищенням класу напруги. Це пов'язано з тим, що на ПЛ 110 кВ іскрові проміжки ОПН на опорах ділянок, що примикають до ураженого, спрацьовують практично при всіх грозових хвилях, що призводить до близьких за характером процесів при обох способах установки ОПН. Ймовірність спрацьовування іскрових проміжків на сусідніх опорах ПЛ 500 кВ і вище зменшується, що призводить до зростання енергії, що поглинається ОПН, встановлених на опорах ураженої ділянки. Слід зазначити, що умови експлуатації підстанційних апаратів при комутаціях полегшуються (струмові і енергетичні навантаження цих апаратів зменшуються приблизно в 1,2-1,5

рази). Умови ж експлуатації підстанційних ОПН при грозових поразках ВЛ можуть кілька погіршити.

Результати розрахунків показників надійності ПЛ при грозових поразках в разі встановлення ОПН на опорах і при їх відсутності наведені в табл. 1. При установці ОПН відключення ПЛ відбувається лише в разі перекриття лінійної ізоляції, тобто в разі, якщо залишається напруга на ОПН перевищує розрядна напруга ізолюючої підвіски. Кількість відключень ПЛ при використанні ОПН зменшується в середньому на три порядки. Лише на ВЛ 1150 кВ зі стандартними опорами типу ПОГ-1150-5 кількість відключень зменшилася всього в 13 разів. Це пов'язано з досить великим залишаються напругою на ОПН при його спрацьовуванні.

Підвісні апарати на напругу 110-1150 кВ можуть бути виконані в одноколонковом виконанні і розраховані на протікання імпульсного струму 15-60 кА при питомій енергії, що поглинається 0,5-9,5 кДж / кВ, що залежить від класу ВЛ, її конструктивного виконання і прийнятого показника надійності.

Спосіб приєднання захисного апарату до проводів ПЛ (з іскровим проміжком або без нього) не є критичним і може вибиратися при конкретному проектуванні з урахуванням особливостей тросової захисту ПЛ, метеорологічних умов, параметрів вольт-амперної характеристики ОПН і т.д. В даний час слід вибирати характеристики і конструкцію ОПН стосовно того об'єкту, де з економічних міркувань доцільно посилення захисту ПЛ від ударів блискавки.

У розподільних мережах 6-35 кВ.

Оскільки при однофазному замиканні на землю (ОЗЗ) в таких мережах напруга на «здорових» фазах досягає лінійної напруги, то умови експлуатації не відключається захисного апарату істотно залежать від тривалості режиму ОЗЗ. У розподільних мережах (що не містять обертових машин) тривалість

ОЗЗ в даний час не нормується. Тому в якості  $U_{\text{нро}}$  в таких мережах має бути прийнято найбільша робоча лінійна напруга. При певних експлуатаційних умовах це напруга може бути дещо збільшено. Однак слід пам'ятати, що збільшення  $U_{\text{нро}}$  призводить до підвищення ВАХ і, отже, до менш глибокому обмеження перенапруг.

Основним процесом, що визначає необхідну енергоємність ОПН, є процес, який супроводжує однофазне дугове замикання на землю (ОДЗ) при переміжної дузі. Енергія, що поглинається ОПН протягом цього процесу, що супроводжується кількома повторне запалення дуги, залежить від режиму заземлення нейтралі мережі. Найбільша питома енергія спостерігається при ізольованій нейтралі мережі. У разі заземлення нейтралі мережі за допомогою ДГР, умови експлуатації ОПН полегшуються, так як число повторних запалень дуги навіть при деякій розладі ДГР зменшується. У разі, якщо нейтраль мережі оснащена резистором, кратності перенапруг при ОДЗ, як правило, не приводять до спрацьовування ОПН.

#### У мережах власних потреб

Свої особливості має експлуатація ОПН в мережах власних потреб електричних станцій і в інших електричних мережах, що містять електричні двигуни. Як правило, до секцій шин електродвигунів під'єднуються за допомогою кабелів. Протяжність кабелів залежить від типу станції і лежить в діапазоні від 30 до 500 м. Від однієї секції шин, як правило, живиться кілька приєднань з двигунами.

Ізоляція електрообладнання (в якості розрахункової слід приймати значення електричної міцності обмотки ізоляції електричних двигунів при профілактичних випробуваннях) піддається впливам при однофазних дугових замиканнях на землю і при комутаціях включення і відключення двигунів, що супроводжуються повторне запалення дуги у вимикачі. Найбільший енергетичний потенціал мають впливу на ОПН при однофазних дугових



замиканнях. Комутаційні перенапруги мають істотно меншим енергетичним потенціалом.

Найбільш надійним є система захисту, що включає в себе заземлюючі резистори, підключені до шин секцій за допомогою спеціальних трансформаторів або пристроїв, та встановлення ОПН безпосередньо у кожного двигуна. У разі відсутності резистивного заземлення нейтралі та встановлення ОПН у кожного двигуна, до вольт-амперної характеристики ОПН пред'являються досить жорсткі вимоги щодо їх ідентичності для кожного приєднання (в опорній точці ВАХ по току залишаються напруги на ОПН не повинні відрізнятися більш ніж на 5-10%). Це пов'язано з тим, що при однофазному дуговому замиканні на землю на шинах або на будь-якому з приєднань при відсутності резистора в нейтралі мережі все ОПН експлуатуються паралельно. У разі ж резистивного заземлення нейтралі ОПН при однофазному дуговому замиканні на землю не спрацьовують.

При виборі системи захисту від перенапруг мережа власних потреб електричних станцій і близьких до них за структурою насосних і компресорних станцій протяжних нафто- і газопроводів у разі ізолюваної нейтралі цих мереж або в разі встановлення ОПН безпосередньо за вимикачем приєднань слід проводити відповідний комплекс розрахунків індивідуально для кожного об'єкта. При оснащенні мережі власних потреб вакуумними вимикачами слід враховувати також перенапруження, що виникають при відключенні загальмованих двигунів. Ці перенапруги характеризуються невисоким енергетичним потенціалом, але можуть перевищувати електричну міцність не тільки корпусної ізоляції двигуна, але і виткової ізоляції обмотки статора. Тому, як правило, вакуумні вимикачі поставляються в комплекті з гострою нирковою недостатністю.

#### 1.3.1. Обмежувачі перенапруг нелінійні з іскровим проміжком

Конструкції і особливості застосування

Як уже зазначалося, основне застосування ОПН пов'язано з грозозахистом повітряних ліній. Вихідні вимоги, що пред'являються при цьому до ОПН, полягають в наступному: забезпечення захисту ізоляції лінії від пошкодження при ударі блискавки, і при цьому ризик їх власного пошкодження повинен бути мінімальним; адаптація до установки і монтажу на існуючих опорах ПЛ.

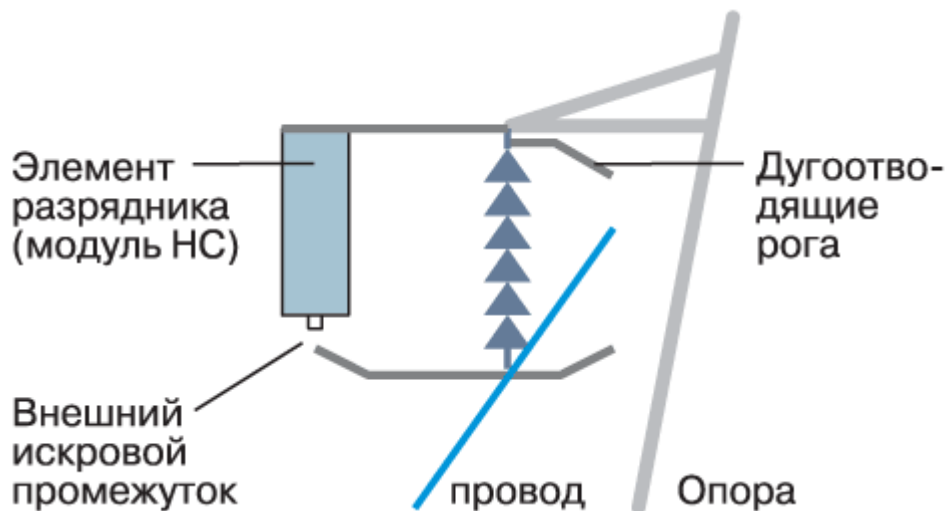


Рисунок 1.3.2

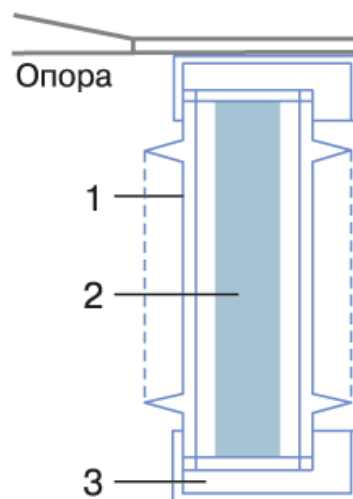


Рисунок 1.3.3

Конструкція елемента розрядника

1 - Корпус розрядника

## 2 - Нелінійний опір

### 3 - Пристрій скидання тиску

З функціональної точки зору, ОПН повинні обмежувати напругу на ізоляції і запобігати її перекриття. У нормальному робочому режимі вони не повинні погіршувати ізоляцію лінії, а пошкодження ОПН в разі перевантаження не повинно призводити до тривалого відключення лінії через неустанним КЗ. З точки зору застосування, пошкодження ОПН не повинно призводити до пошкодження ізоляції ПЛ і викликати великий ризик для персоналу, що знаходиться поблизу. Крім того, ОПН необхідно мати такі характерні особливості: великий термін служби; стійкість до впливу зовнішніх кліматичних факторів; легкість монтажу; зручність обслуговування і контролю.

Виділяються два основних типи ОПН. Перший - розрядники із зовнішнім іскровим проміжком, що відокремлює нелінійне опір від проводу. Другий - розрядники без будь-якого проміжку, тобто з прямим підключенням нелінійного опору до проводу. Конструкції ОПН схематично показані на рис. 1.3.3.

#### ОПН із зовнішнім іскровим проміжком.

У цих розрядниках (рис. 1.3.2) нелінійний опір відокремлений від проводу зовнішнім іскровим проміжком. Нелінійний опір виконується у вигляді окремого модуля, аналогічного по конструкції безіскрова ОПН. Модуль нелінійного опору монтується на траверсі опори або ж на консолі до неї з деяким зміщенням від гірлянди ізоляторів. Зовнішній проміжок утворюється між нижнім кінцем модуля нелінійного опору і проводом. Будь-які спеціальні системи електродів для організації іскрового проміжку в принципі не обов'язкові, хоча за кордоном вони найчастіше використовуються. Спеціальні електроди кращі при великих довжинах ізоляції на високі класи напруги ( $> 330$  кВ) для забезпечення стабільності

розрядних характеристик іскрового проміжку.

У нормальному режимі через велику власної ємності нелінійного опору практично всю напругу прикладається до зовнішнього проміжку. При впливі грозових перенапруг, які становлять небезпеку для ізоляції лінії, зовнішній проміжок перебивається і напруга на ізоляції обмежується до рівня залишається напруги на нелінійний опір при даному розрядному струмі. Після протікання розрядного струму (струму блискавки) в проміжку залишається іонізований канал, по якому протікає супроводжуючий струм, визваний робочою напругою лінії. Цей струм повинен обриватися протягом короткого часу, щоб не викликати теплового пошкодження нелінійного опору і переходу імпульсного перекриття в силову дугу. Для забезпечення нормальної роботи ОПН із зовнішнім іскровим проміжком необхідне виконання наступних умов:

розрядні характеристики зовнішнього проміжку і рівень залишається напруги на НС повинні бути скоординовані з розрядними характеристиками лінійної ізоляції для забезпечення випереджаючого спрацьовування ОПН по відношенню до перекриття ізоляції;

характеристики ОПН, включаючи характеристики нелінійного опору і зовнішнього проміжку, повинні бути підібрані таким чином, щоб забезпечити обрив супроводжуючого струму після спрацьовування ОПН протягом короткого часу при першому переході струму через нуль.



Рисунок 1.3.4





На рис. 1.3.4 показаний фрагмент випробувань макетного зразка розрядника з зовнішнім іскровим проміжком в лабораторних умовах. Він наочно ілюструє «роботу» розрядника як засіб захисту ізоляції лінії від перенапруг. Приблизно так само буде виглядати дію ОПН і при ударі блискавки в лінію. Такі розрядники мають ряд переваг в порівнянні з безіскровою ОПН. Оскільки нелінійний опір розрядника не знаходиться постійно під напругою і не піддається впливу тимчасових і комутаційних перенапруг, воно може бути скомплектовано на меншу номінальну і залишається напруга. Вимоги до ізоляції нелінійного опору також можуть бути істотно полегшені. Крім того, для розрядників даного типу не потрібно «відділювач», а його пошкодження практично не має негативних наслідків для роботи лінії.

#### Досвід експлуатації та ефективність застосування

Приблизно чверть від загальної кількості ОПН в світі встановлені в Японії, де накопичено найбільший досвід їх застосування. Починаючи з 1991 року щорічно встановлюється близько 7000 штук. Велика частина з встановлених ОПН (~ 88%) припадає на лінії 66,77 кВ. Переважна частина ОПН (~ 99%) - це розрядники із зовнішнім іскровим проміжком. Схожі тенденції по установці ОПН мають місце в США і інших країнах. Більше половини з 30 енергокомпаній в США застосовують ОПН на лініях 69-230 кВ. Практично всі, хто на даний момент в експлуатації розрядники мають зовнішній іскровий проміжок і полімерну оболонку. В процесі впровадження ОПН в Японії випробували різні схеми установки розрядників на опорах за кількістю фаз і ланцюгів, які вони захищають. Можна виділити три варіанти, що втілюють різну «філософію» застосування ОПН (див. Табл. 1.2.3). Варіант 1 - захищаються всі три фази одного ланцюга на опорі з двома ланцюгами. Цей варіант захисту націлений на виключення межцепних замикань і збереження в роботі хоча б одного ланцюга. Варіант 2 - захищаються всі три фази обох ланцюгів на опорі з двома

ланцюгами. Цей варіант покликаний забезпечити повну відсутність відключень на лінії при ударах блискавки. І варіант 3 - захищаються одна або дві фази одного ланцюга на опорі з двома ланцюгами. Цей варіант є компромісним, і розглядався як експеримент з економічної точки зору для вивчення ефективності подібного застосування.

Таблица 1.2.3.

Номер варианта	Схема установки разрядников	Количество установленных разрядников	Количество линий с разрядниками
1		36846 (98,2%)	559
2		643 (1,7%)	4
3	 Любые 2 фазы одной цепи	40 (0,1%)	2
	 Любая фаза одной цепи	6 (0,02%)	1

Як випливає з табл. 1.2.1.1, на більшій частині ліній (98%) реалізується варіант захисту 1. Варіант 2 використовується у виняткових випадках. А варіант 3 за результатами експлуатації на сьогоднішній день визнаний неефективним.

Аналогічні схеми установки ОПН на опорах (варіанти 1 і 2) застосовуються в США. Крім того, на лініях без грозозахисних тросів, але мають хороше заземлення, застосовується установка ОПН тільки на верхніх фазах. У тих же випадках, коли лінії добре захищені від прямих ударів блискавки, але мають поганий заземлення, розрядники часто встановлюються тільки на нижніх фазах, які, як вважається, найбільш схильні до зворотним перекриттям.

Що стосується схем розстановки ОПН (тобто на кожній опорі, кожної другої або третьої), то в основному практикується установка ОПН на кожній опорі. У загальному випадку частоту установки рекомендується визначати в залежності від необхідної надійності захисту. Можна позначити три області застосування ОПН, в яких вони вже підтвердили свою ефективність.

1. Захист ПЛ, особливо двоколових ПЛ на опорах баштового типу, в районах з погано проводять ґрунтами і великим опором заземлення опор. Застосування ОПН в цьому випадку дозволяє виключити межцепних замикання і забезпечити надійну роботу (без відключень) хоча б однієї з ланцюгів.

2. Захист локальних ділянок ПЛ. Відомі приклади застосування ОПН в США для захисту ділянок ліній на переходах через річки. Electricite de France встановила ОПН на лініях 90 кВ в часто відвідуваних зонах (ігрові майданчики, спортивні зони, зони відпочинку) для запобігання ризику потрапляння людей під небезпечне «напруга дотику» або «кроку», яке може виникнути при перекритті ізоляції і КЗ на лінії. Необхідність захисту локальних ділянок може бути обумовлена також неоднорідністю умов по трасі лінії, тобто наявністю ділянок з поганими опорами заземлення опор і схильних до частих розрядів блискавки.

3. Захист ПЛ без грозозахисних тросів. Відомі приклади такого застосування ОПН в США на лініях, які спочатку були побудовані без грозозахисних тросів. Виявилося більш економічним обладнати їх розрядниками, ніж збільшувати висоту опор і встановлювати грозозащити. Ефективність застосування ОПН в Японії оцінювалася на підставі даних про спрацювання в процесі дослідної експлуатації на лініях різних класів напруги від 33 до 500 кВ. Спрацювання ОПН було зафіксовано на 800 опорах (всі дані відносяться до дволанцюгових ліній із захистом ОПН трьох фаз одного ланцюга.). У 769 випадках з 800 (96%) воно вважалося успішним, оскільки не

було відключення двох ланцюгів. На цій підставі зроблено висновок про ефективність застосування ОПН для запобігання міжцепних замикань і одночасного відключення двох ланцюгів. Поряд із зазначеними успішними спрацьовуваннями, були зафіксовані також неуспішні спрацьовування ОПН з відключенням лінії (31 випадок). Встановлено, що в 10 випадках це було пов'язано з неправильною координацією розрядних характеристик ОПН з характеристиками лінійної ізоляції.

Заслуговує на увагу порівняння питомих показників по числу грозових відключень ПЛ до і після установки розрядників. На двоколових ВЛ 77 кВ в Японії число відключень (ланцюгів 1 і 2) до установки розрядників становило 12,2 і 11,3 на 100 км в рік, і при цьому більше половини відключень були дволанцюгові. Після установки розрядників тільки на одного ланцюга, аварійних відключень на ній зафіксовано не було, а число відключень ланцюга без розрядників знизилося з 11,3 до 6,1 на 100 км в рік, тобто на 46% від початкової кількості. Останнє показує, що розрядники не тільки захищають ті фази, на яких вони встановлені, але і істотно поліпшують захист інших фаз. Відомий досвід експлуатації двох ліній 115 кВ в США, на яких розрядники із зовнішнім проміжком встановлені на всіх опорах і на всіх фазах. Протягом вже 4 років лінії експлуатуються без відключень і без пошкоджень самих розрядників.

Розрядник без іскрового проміжку має ряд переваг порівняно з вентильним розрядником (простота конструкції, зниження захисних характеристик, підвищена здатність до поглинання енергії. Високі струми можуть бути наслідком тимчасових перенапруг, викликаних несправностями або ферорезонансом, і призводять до нагрівання; якщо перенапруги досить великі за величиною і тривалістю, температура може зростати достатньо, щоб відбуватися тепловий відтік і збій. Крім того, напруга розряду зростає зі збільшенням струму розрядки розрядника.



Працездатність блоків ОПН з іскровим проміжком при більш високих струмах розряду може бути покращена, обладнавши їх шунтом, який призначений для зменшення струму кожного разу, коли струм розряду через розрядник перевищує певне значення; наприклад, 10 кА.

### 1.3.2. Обмежувачі перенапруг нелінійні без іскрового проміжку

За конструктивним виконанням розрядники даного типу (рис. 1.3.5) не відрізняються в принципі від підстанційних ОПН. Розрядник складається з ZnO елементів, зібраних в колонку і поміщених в ізоляційний корпус - фарфоровий або полімерний. Більш кращим для ОПН вважається полімерний корпус в оболонці з кремнийорганіческою гуми. Корпус розрядника в обов'язковому порядку обладнаний пристроєм скидання тиску для запобігання його вибухового руйнування і пошкодження при цьому ізоляції лінії. Розрядники даного типу оснащені спеціальним пристроєм - «віддільником», яке спрацьовує при перевантаженні розрядника і розриває ланцюг його підключення, усуваючи тим самим утворення тривалого КЗ на лінії при пошкодженні розрядника.

Можливі два способи установки таких ОПН на опорі. Перший спосіб - ОПН жорстко закріплюється на траверсі або на консолі до траверсі опори і гнучким провідником підключається до дроту. Другий, більш кращий спосіб - варіант вільної підвіски, коли один кінець ОПН кріпиться до підтримуючого затискача проводу або ж за допомогою спеціального затиску до самого проводу, а інший кінець гнучким заземлювальним провідником підключається до опори.

Позитивною якістю ОПН даного типу є стабільність захисної характеристики незалежно від зовнішніх умов. Однак нелінійне опір такого розрядника постійно знаходиться під напругою, що негативно позначається на його надійності і змушує завищувати його параметри по номінальній напрузі. Крім того, пошкодження такого розрядника, може призвести до

відключення лінії на тривалий час або ж проведення ремонтних робіт під напругою.

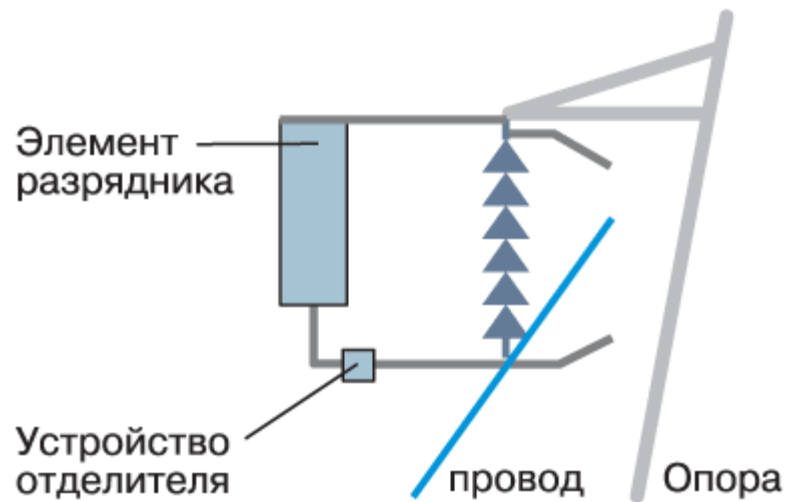


Рисунок. 1.3.5

Показовий приклад ОПН з безіскровим проміжком - лінія 110 кВ в долині Black Forest, частина опор якої розташована в скельному ґрунті на вершині пагорба. Установка безіскрова розрядників тільки на 5 опорах цієї лінії, що знаходяться на небезпечній ділянці, дозволила суттєво підвищити надійність лінії в цілому. Протягом 5 років після установки розрядників зворотні перекриття на проблемних опорах і відключення лінії були відсутні, в той час як до установки розрядників число відключень становило в середньому 4 в рік.

Проект грозозахисту Дволанцюговий ВЛ 400 кВ «Лінке - 1,2» в МЕМ «Північно-Заходу». Лінія проходить по сухим піщаним і скельним ґрунтам. До установки ОПН грозові відключення, в тому числі одночасно 2 ланцюгів, відбувалися в середньому 1-2 рази на рік. Для запобігання вказаних відключень розрядники були встановлені на «проблемному» ділянці лінії на всіх трьох фазах обох ланцюгів на кожній опорі. За походженням і конструктивним виконанням - це розрядники типу PEXLINK фірми ABB, без іскрового проміжку, в полімерному корпусі, оснащені лічильниками

спрацювань. Протягом 2 років з моменту установки ОПН в 2004 р грозіві відключення на даній лінії і пошкодження розрядників зафіксовані не були. На жаль, ми не маємо даних про спрацювання розрядників, яких, за найскромнішими оцінками, повинні були накопичитися десятки. Ця інформація була б вкрай корисною для оцінки досвіду експлуатації і ефективності застосування ОПН. Поки ж досвід експлуатації не настільки значний.

ОПН без іскрового проміжку формується з різноманітних матеріалів за допомогою технологічного процесу, який забезпечує бажані електричні властивості варистору. Типова структура варистора складається з високопровідних частин, зазвичай  $\text{ZnO}$ , у напівпровідниковому матеріалі. Процес виготовлення визначає розмір частинок, а також товщину та опір напівпровідного матеріалу. Розрядник постійно знаходиться під напругою, але струм витоку випромінювання через розрядник настільки малий, що немає небезпеки термічних втрат.

Вольт-амперна характеристика, виявляє зміни при малих струмах (в районі міліампер). Вольт-амперна характеристика ОПН в захисній області (сильний струм) є нечутливою до температури, але вольт-амперна характеристика при малих струмах є чутливою до температури. Для прикладеної напруги, близької до номінальної, електричний струм через розрядник є переважно ємнісним з низьким значенням на рівні міліампер. Зі збільшенням напруги струм збільшується набагато швидше. Збільшення струму відбувається в компоненті, який знаходиться у фазі з напругою, тоді як ємнісний компонент залишається постійним.

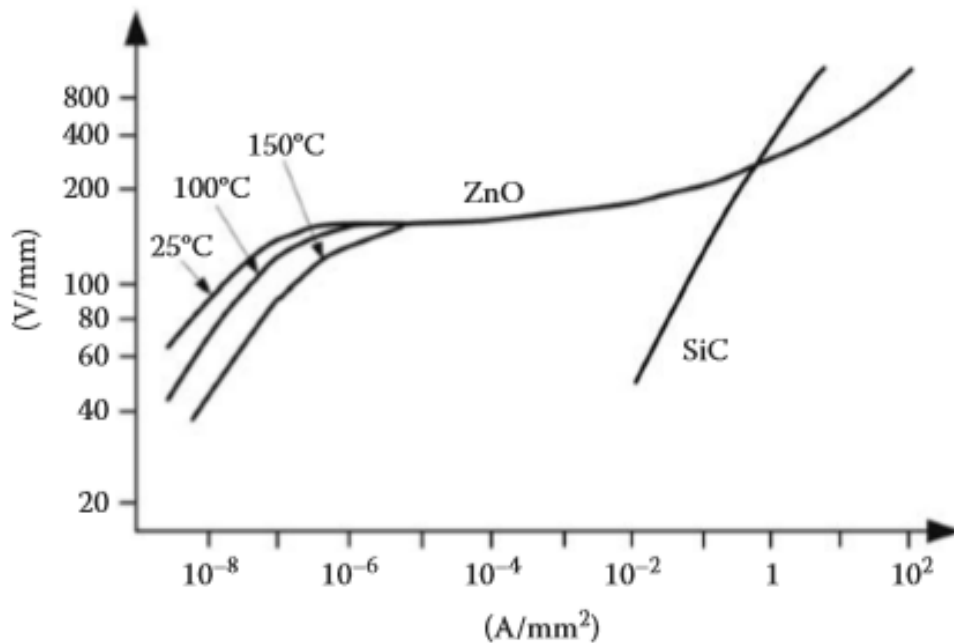


Рис. 1.3.6

Напруга розрядки розрядника для заданої величини струму прямо пропорційна висоті штабеля елемента клапана і приблизно пропорційна номінальній напрузі розрядника. Робота розрядника чутлива до швидкості підйому вхідного струму: чим вище швидкість підйому струму, тим більше зростає обмежувальна напруга. Висловлено припущення, що більша напруга розряду блоку ОПН для більш високих темпів підйому струму обумовлена негативним коефіцієнтом температури опору клапана, див. рисунок 1.3.6. Миттєва температура та опір клапанного блоку є функцією енергії, що розсіюється в блоці до цього моменту. Однак енергія, що розсіюється в блоці клапанів для будь-якого заданого рівня струму на передній частині поточної хвилі, менша для більш швидкого зростаючого струму, ніж для більш повільного зростаючого струму на тому ж рівні струму. Тоді миттєвий опір клапанного блоку буде вище для швидшого зростаючого струму, ніж для повільного зростаючого струму. Отже, напруга розряду для більш швидкого зростаючого струму буде вище.

У попередній конструкції нелінійні елементи були оточені газоподібним середовищем, а кінцеві фітинги, як правило, герметичні гумовими кільцями. З часом роботи, особливо у поганих умовах, ущільнення мали тенденцію до погіршення, що дозволяло потрапляти вологи. У 1980-х роках були розроблені полімерні розрядники. Поверхня таких ОПН покрита скляною фібровою смолою. Ця конструкція не має порожнень, надає агрегату високу механічну міцність і забезпечує рівномірний розподіл напруги. Матеріал корпусу стійкий до відстеження і придатний для застосування в забруднених регіонах. Переваг полімерних розрядників перед їх порцеляновими еквівалентами багато і включають легку модульну збірку, не загрожують персоналу чи сусідньому обладнанню під час роботи струму несправності або зменшують забруднення внаслідок проблем.

Для скорочення та спрощення технічного обслуговування розроблені розрядники, вбудовані в обладнання (наприклад, лінійні ізолятори).

ОПН без іскрового проміжку складається з декількох метал-оксидних елементів, з'єднаних лінією із землею. Опір оксиду цинку змінюється напругою, але зміна є більш різкою порівняно з вентильними розрядниками. Висока нелінійність дозволяє розробити оксид цинку таким чином, що вони проводять лише малий струм при нормальних умовах напруги системи та набагато більший струм при дещо більшій напрузі. У зоні високого струму прилад втрачає нелінійність через лінійний опір.

Значне розсіювання потужності відбувається через проходження струму витоку. Перенапруги на нелінійних призводить для термічних втрат.

Таблиця 1.3.4. Порівняльні характеристики застосування ОПН різного типу

ОПН із зовнішнім іскровим проміжком	ОПН без іскрового проміжку
Захист лінії тільки від грозових перенапруг.	Захист лінії тільки від грозових перенапруг.
НС розрядника не пов'язано безпосередньо з лінією, отже, використовується менше ZnO блоків на той же рівень напруги, що передбачає більш низьке номінальну напругу, яке залишається напруга і знижену вартість.	ZnO елементи безпосередньо пов'язані з лінією, отже, використовується більша кількість ZnO блоків на той же рівень напруги, що передбачає більш високу номінальну напругу, яке залишається напруга і підвищену вартість.
Визначення пошкодженого елемента утруднено - тільки по слідах пошкоджень корпусу.	Пошкоджений елемент можна виявити візуально, використовуючи допомогою розподільника.
Забруднення зовнішньої оболонки не впливає на нелінійне опір.	Забруднення зовнішньої оболонки може привести до перегріву нелінійного опору.
Перекриття зовнішнього іскрового проміжку залежить від атмосферних умов.	Атмосферні умови не впливають на роботу розрядника.
Атмосферні умови не впливають на роботу розрядника.	Розрядник повинен бути від'єднаний при роботі під напругою.
Енергія блискавки розподіляється тільки між двома розрядниками однієї ділянки лінії.	Розподіл енергії блискавки забезпечується серед кількох розрядників однієї ділянки лінії.

При застосуванні в нормальному режимі є переважно провідним і має резистивний компонент, який спотворюється. Зі збільшенням нелінійності збільшується спотворення в резистивній складовій струму. Ця зміна струму при різних рівнях напруги означає, що між напругою, струмом та розсіюванням потужності немає постійного зв'язку. Рівняння, що моделює вольт-амперну характеристику:

$$V = \frac{C_1}{C_2 - \ln I} + RI$$

де  $V$  – падіння напруги на резисторі,  $C_1$  і  $C_2$  - константи,  $I$  - струм розрядника, а  $R$  - еквівалентний опір елемента клапана. Константи  $C_1$  і  $C_2$  дещо відрізняються залежно від виробників та розмірів розрядника.

Так зване «альфа-рівняння» для моделювання характеристик VI використовується в значній мірі і надається:

$$V = KI^{\frac{1}{\alpha}}$$

де  $V$  – падіння напруги на резисторі,  $I$  - струм розрядника,  $K$  – коефіцієнт пропорційності, а  $\alpha$  - константа нелінійності.

Перевага ОПН без іскрового проміжку полягає в тому, що вони можуть поглинати більше енергії. Можливість поводження з енергією опублікована виробниками і залежить від межі термічної стійкості та межі теплового удару розрядника.

Максимальна безперервна робоча напруга це напруга при якій блок може залишатися термічно стабільним після стандартних випробувань при імпульсному режимі. Розрядник не здатний постійно витримувати напруги, що перевищують його значення максимальної безперервної робочої напруги. Розрядники, як правило, з'єднані від фази до землі. Розрядник на кутово-заземленій системі або дельта-підключена система з несправністю на одній фазі буде піддаватися фазовому напрузі і повинен витримувати фазові

напруги. Тому з'єднання ланцюга, наприклад, дельта, однофазний в'її, а також з'єднання розрядника, повинні враховуватися.

Напруга робочого циклу визначається як максимально допустима напруга між його клемми, на яких розрядник призначений для виконання свого робочого циклу. Номінальна напруга робочого циклу вище максимальної робочої напруги. Розрядник буде працювати в режимі напруги робочого циклу протягом обмеженої тривалості.

Іншою альтернативою для більш високих струмів розряду є паралельне підключення розрядників. Струм розряду для кожного розрядника зменшується і, отже, знижується напруга розряду. Цей варіант може бути застосований за допомогою ОПН лише тоді, коли потрібно точно відповідати характеристикам розряду. Вентильні розрядники мають широку толерантність характеристик, і розподіл струму між паралельними блоками буде непередбачуваним. Тому розрядники з іскровими проміжками не повинні бути паралельними. Найбільш вигідне поліпшення отримується з двома розрядниками паралельно.

### 1.3.3. Переваги та недоліки обмежувачів перенапруг нелінійних

Переваги ОПН:

1. Варістори - високонелінійні резистори об'ємного типу, що застосовуються в ОПН, мають резконелінійну вольтамперних характеристику, мають високу стабільність, яка не змінюється в процесі тривалої експлуатації ОПН.

2. Безінерційна відстеження перепадів напруги.

3. Велика швидкодія спрацьовування ОПН при комутаційних і грозових напружених.

4. Відмінні пікові електричні характеристики в широкому діапазоні робочої температури.



5. Застосування варисторів в одноколонковом виконанні дозволяє забезпечити особливо глибоке обмеження напруг і, відповідно, більш високу надійність роботи високовольного обладнання і поліпшення якостей параметрів електричних мереж.

6. Зменшення розміру і ваги ОПН в 10 ... 20 раз дозволяє встановити їх безпосередньо на висновках трансформаторів, електродвигунів, в осередках КСВ і КРУ, підстанціях, електрифікована транспорті.

7. Забезпечено можливість створення одноколонкових ОПН на всі класи напруг, при цьому максимально використовується обсяг корпусу апарату, що також значно знижує масу ОПН в порівнянні з багатоколонковими ОПН і істотно підвищує надійність роботи.

8. Технологія виробництва склопластикових корпусів або односпрямованих стрижнів з нанесенням на них захисного ребристого покриття (оригінальної форми) дозволяє випускати ОПН в одноелементна виконанні 1 ... 3 м. При великих класах напруги мережі ОПН складають з двох або трьох частин (модулів). Така конструкція забезпечує мінімальну металоємність і висоту ОПН і підвищує надійність роботи ОПН при зволоженні і забрудненні поверхні апарату.

9. Висока механічна міцність і мала маса ОПН дозволяє встановлювати їх не тільки на підстанціях, а й безпосередньо на лініях електропередач (ЛЕП) без посилення конструкції опор. При цьому з'являється можливість обмеження грозових перенапруг на окремі опори високовольних мереж, наприклад, на ізолюючої підвісці переходів через водні перешкоди великої ширини, на перетинах двох ліній, коли доводиться застосовувати опори збільшеної висоти, або у випадках, коли опір заземлення окремих опор має підвищене значення по порівняно з іншими опорами (скелястий ґрунт, пісок і т.д.).

10. Ефективне застосування ОПН на підходах до підстанцій для обмеження грозових перенапруг.

11. Застосування підвісних ОПН на ЛЕП дозволяє забезпечити практично рівне обмеження комутаційних перенапруг уздовж ліній електропередач будь-якої довжини.

12. Застосування ОПН для новостворюваних ЛЕП дозволить істотно змінити висоту опор, знизити їх габарити і металоємність.

13. В даний час застосування порцеляни як конструкційний матеріал ОПН оцінюється технічно необґрунтованим через збільшуються вимог щодо зменшення масо-габаритних показників і вибухобезпеки.

14. ОПН в полімерних корпусах не вимагають обслуговування, не ушкоджуються при транспортуванні і зберіганні. Малі масо-габарити ОПН дозволяють легко виконувати монтаж при мінімальному використанні техніки.

Обмежувач перенапруг - це апарат, достовірну причину пошкодження якого часто можна вказати. Причинами можуть бути:

невірний вибір ОПН (з вини проектувальників або відповідальних осіб, які представили невірну або неповну вихідну інформацію);

неналежні умови експлуатації (наприклад, підвищений понад допустимого для ОПН рівень напруги в місці установки апарату);

якість виготовлення самого ОПН (з вини виробника).

Труднощі у визначенні причин пошкодження ОПН призводять до того, що надійністю роботи ОПН займається не тільки завод-виготовлювач, а й проектувальники, які вибирають ОПН з «запасом».

Крім того, надійністю обмежувачів перенапруг займаються і експлуатуючі організації, для яких існує набір рекомендацій щодо усунення небажаних для ОПН схемно-режимних ситуацій. Звичайно, надійність ОПН - важлива складова надійності всієї енергосистеми. Проте не зовсім ясно, який саме рівень надійності ОПН слід визнати економічно виправданим.

Розробка методик вибору характеристик ОПН для конкретних умов експлуатації стримується відсутністю достовірних відомостей про наявному робочому ресурсі варисторів, і в тому числі численних співвідношень між впливають факторами і ресурсом. Такі відомості можуть бути отримані або при проведенні відповідних випробувань варисторів ОПН, або на основі аналізу та узагальнення досвіду експлуатації обмежувачів перенапруг. До тих пір, поки такі роботи не будуть проведені, в методиці вибору ОПН не можна буде поставити крапку.

#### 1.3.4. Заміна вентиляльних розрядників на обмежувачі перенапруг нелінійні

Зміна застарілих вентиляльних розрядників 110-750 кВ на сучасні ОПН дозволить знизити впливу комутаційних і грозових перенапруг на обладнання цих класів номінальної напруги.

У 90-ті роки через високу трудомісткість виробництва і настройки іскрових проміжків для РВ вітчизняні підприємства повністю припинили випуск вентиляльних розрядників, але при цьому істотно розширили номенклатуру ОПН.

В даний час більшість вентиляльних розрядників експлуатується за межами нормативного терміну служби, що становить 20 років. Внаслідок природного старіння використаних в конструкції матеріалів, як показують нечисленні дослідження, захисні властивості РВ до кінця нормативного терміну служби помітно змінюються навіть у тих розрядників, число спрацьовувань яких не перевищує нормоване заводом-виробником. При цьому в більшості випадків пробивна напруга іскрових проміжків постарених розрядників стає помітно нижче, а залишається напруга на нелінійному резисторі вище.

Ідентичність функціонального призначення РВ і ОПН і уявна простота конструкції останнього часто призводять до того, що заміну розрядників на

обмежувачі перенапруг проводять без перевірки допустимості використання встановлюється ОПН в даній точці мережі.

Як показують дослідження і вітчизняний досвід експлуатації нелінійних обмежувачів, в електричних мережах номінальною напругою 110-750 кВ найбільш важкими є умови роботи ОПН при квазістаціонарних підвищеннях напруги. Тривалість і значення підвищень напруги в цих режимах визначаються видом комутації, а обмеження часу існування таких режимів повинно здійснюватися вибором комутованих схем і часом дії відповідної релейного захисту або протиаварійної автоматики.

Вибір основних характеристик ОПН 110-750 кВ повинен проводитися з урахуванням впливів, яким піддаються ці захисні апарати в експлуатації. Очевидно, що в ряді випадків для підвищення надійності роботи ОПН в електричних мережах може знадобитися проведення спеціальних схемно-режимних заходів, наприклад, по унеможливленню виникнення при комутаціях резонансних контурів. У таких випадках каскадність дії основних і резервних релейних захистів, а також протиаварійної автоматики повинні бути скоординовані з допустимою тривалістю підвищення напруги не тільки на захищається обладнанні, а й на ОПН.

Подібні заходи повинні бути розроблені і реалізовані для існуючих мереж, де виробляється або вже проведена заміна вентильних розрядників на ОПН, і нових, тільки ще проєктованих мереж, де нелінійні обмежувачі спочатку передбачені в якості основних апаратів для обмеження перенапруг. В наведено ряд таких заходів.

На жаль, у вітчизняній нормативній документації відсутні методики, що дозволяють обґрунтовано вибрати основні характеристики ОПН. Найчастіше через це вибирають ОПН з необґрунтовано завищеними струмом пропускної здатності і питомої поглинається енергією. В результаті вибрані з «хорошим» запасом ОПН (в основному по току пропускної здатності) піддаються помітно

меншим допустимих впливів. Природно, що зростання енергоємності ОПН призводить до істотного подорожчання апарату (приблизно на 25% при переході до кожного наступного класу розряду лінії).

#### 1.4. Висновки по розділу 1

Вентильні розрядники, зібрані експлуатуючими організаціями з справних елементів розукомплектованих однотипних РВ, не можуть забезпечити необхідну надійність захисту устаткування ПС від перенапруг.

Заміна застарілих вентильних розрядників 110-750 кВ на сучасні ОПН дозволить знизити впливу комутаційних і грозових перенапруг на обладнання ПС цих класів номінальної напруги.

Можливість установки ОПН (в тому числі замість застарілих РВ) повинна бути перевірена відповідними розрахунками достатності його характеристик для задоволення умов експлуатації на кожній конкретній ПС.

При виборі характеристик обмежувачів перенапруг для конкретних умов експлуатації повинні бути розглянуті необхідність і можливість проведення в мережі спеціальних схемно-режимних заходів, що обмежують до допустимих значень вплив на ОПН квазістаціонарних перенапруг.

Викладені в вітчизняній нормативній документації методики вибору ОПН вимагають доопрацювання.

Спосіб приєднання ОПН до проводів ПЛ - безіскрової або через іскровий проміжок. Обидва способи приєднання підвісного обмежувача до фазним проводам мають як переваги, так і недоліки. До основних переваг іскрового приєднання можна віднести відсутність постійно протікає струму в нормальному експлуатаційному режимі. Недоліком цього типу захисту є досить складна координація пробивних напруг відкритих іскрових проміжків з розрядними напруженнями захищається лінійної ізоляції. При виборі

способу приєднання апарату до проводу насамперед повинні враховуватися всякого роду зовнішні чинники: забруднення ізоляторів і ОПН, можливість тривалого впливу підвищеної напруги промислової частоти і ін.

ОПН є не відключається апаратами, тому вибір їх характеристик обумовлений не тільки необхідним захисним рівнем, але і надійною експлуатацією самого апарату при всіх режимах експлуатації мережі. В даний час при проектуванні засобів захисту, що включають в себе ОПН, доцільно проводити досить повне комп'ютерне моделювання як самої мережі, так і захисного апарату. При цьому на основі проведених розрахунків можна не тільки вибирати апарати, вироблені в даний час різними виробниками, але і в ряді випадків замовляти виробникові апарат з тими характеристиками, які потрібні для надійної експлуатації конкретного об'єкта. Такі ж індивідуальні роботи слід проводити і при заміні розрядників на ОПН.

## 2. ЗАХИСНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ОБМЕЖУВАЧІВ ПЕРЕНАПРУГ НЕЛІНІЙНИХ

### 2.1. Захисний рівень обмежувачів перенапруг нелінійних

Захисний рівень обмежувачів перенапруг нелінійних це максимальна напруга на клеммах розрядника, яку він може підтримувати, поки він скидає на землю надлишкові струми, що перевищують його робочу напругу, не пошкоджуючи кінцеве обладнання або порушуючи безперервність кола живлення. Це є основним параметром, що складає основу вибору для конкретної установки.

Мета розрядника перенапруг - захистити систему від можливих перехідних умов, особливо тих, які можуть перевищувати рівень безпечного імпульсу, витримуючи рівень обладнання. Напруга розряднику відноситься до звичайного типу, а залишкова напруга - до розрядних пристроїв напруги. Розрядник повинен захищати кінцеве обладнання від кожного виду перехідних умов окремо. Тому його захисний рівень повинен перевірятися окремо на всі такі перехідні умови. Якщо для перенапруги блискавки та перемикачів достатньо буде визначити її за амплітудою, то захисний рівень визначатиметься за її амплітудою та переднім часом.

Важкість перехідних умов може бути встановлена на основі минулого досвіду або даних, зібраних з подібних установок. Однак для великих і більш критичних установок, таких як станція або велике комутаційне обладнання, доцільно проводити аналіз перехідних мереж або електромагнітний аналіз перехідних програм за допомогою комп'ютерів. Якщо це не потрібно, система може бути проаналізована таким чином, щоб досягти більш відповідного вибору рівня захисту.

Коли обладнання піддається прямим ударам блискавки. Обладнання, підключене безпосередньо до повітряної лінії або навіть через трансформатор,

потрапить до цієї категорії. Виберіть найвище значення рівня захисту, і навіть тоді захист від перенапруги стане необхідним для критичних установок.

Екрановане обладнання установлюються в приміщенні, як генератор або двигун. Він може зазнавати лише ослаблених сплесків. Тому можна вибрати менший захисний рівень. У більшості випадків захист від перенапруг може не мати суттєвого значення для прямих ударів блискавки.

Коли обладнання піддається сильним внутрішнім порушенням, особливо коли перенапруги круті, як при перемиканні двигунів. Тому потребується більш високий захисний рівень.

Також треба враховувати вплив відбитків від перенапруг, вплив перенапруг а також ефект резонансу.

Це лише основні вказівки. Важко точно визначити оголене або захищене обладнання. Обладнання, встановлене в приміщенні, ніколи не може зазнавати ударів блискавки або їх перенесення, але може піддаватися сильним перехідним перенапругам і вимагати захисту від перенапруг, як для встановленої установки. Не існує готової формули, за якою можна швидко встановити такі рівні, крім досвіду. Інженер проекту є вибирає рівень захисту, залежно від схеми захисту від перенапруг.

## 2.2. Особливості динамічних вольт-амперні характеристики обмежувачів перенапруг нелінійних

Захисні параметри ОПН описуються за допомогою вольт-амперної характеристики варістора. ВАХ варістора залежить від ряду чинників, включаючи спосіб виробництва, рід напруги та значення її частоти, показників імпульсу струму, температурні значення тощо.

Стандартна ВАХ варістора з максимально можливим значенням тривалої допустимої напруги 0.4 кВ зображена на рис. 2.2.1.



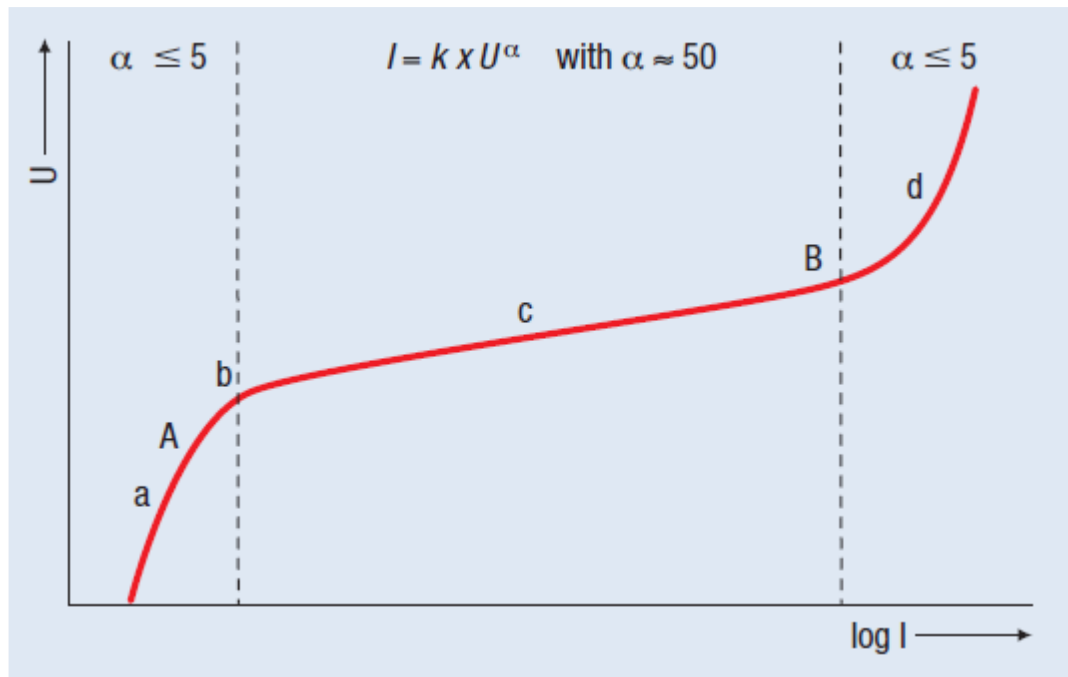


Рис. 2.2.1. Нелінійна вольт-амперна характеристика варістора .

Де  $a$  - ємнісна лінійна площа, струм  $\leq 1\text{mA}$ ;  $b$  - точка характеристичної кривої, перехід від майже ізолюючого в провідний стан;  $c$  - сильно нелінійна область;  $d$  - омичний, лінійна область, область високого струму;  $A$  - область безперервної робочої напруги  $U_c$ ;  $B$  - залишкова напруга  $U_{res}$ , область захисту. [4]

Ділянка низьких значень струмів являє собою результат роботи варістора при дії робочої напруги, яка не виходить за рамки найбільшої допустимої. В цій ділянці опір варістора досить значний. Оскільки варістор не ідеальний, то опір хоч і значний, однак не нескінченний. Виходячи з цього крізь варістор протікає струм провідності. Даний струм не сягає великих значень — менше одного міліампера.

При появі грозового чи комутаційного імпульсу перенапруги в лінії, режим роботи варістора переходить в режим для середніх значень струмів. На перетині початкової ділянки з другою здійснюється ВАХ, в той час як опір

варістора стрімко знижується. Крізь варістор нетривалий час протікає струмовий імпульс, котрий здатен становити десятки тисяч ампер. Варістор після поглинання імпульсної енергії перенапруги, виділяє її в якості тепла. Імпульс перенапруги лінії "зрізається". В області великих значень струму, в той час як опір варістора наново швидко зростає. Дана область являється критичною для варістора.



Рис. 2.2.2 Нелінійний резистор – варістор [4].

Від діаметру варістора залежить пропускну здатність варістора за струмом, а від висоти - параметри за напругою.

На сьогодні варістори, які використовуються для обмежувачів перенапруг виготовляються у вигляді циліндричних дисків діаметр яких складає 28 - 150 мм, висота 5 - 60 мм. На торець диску, за допомогою металізації, наносяться електроди з алюмінію, товщина яких досягає 0.05 - 0.30 мм (рис. 2.2.3). Поверхні з боків диску вкриваються гліфталевою емаллю, яка сприяє росту пропускну здатності при імпульсах струму з крутим фронтом.

Під час виготовлення ОПН те чи інше число варісторів з'єднується послідовно колонкою. В залежності від потрібних параметрів та конфігурації ОПН і наявності на виробництві варісторів, обмежувач перенапруг може

включати в себе ряд колонок, які з'єднуються послідовно чи паралельно між собою, або лише одну (з одним варістором).

Для запобігання негативного впливу грозових та комутаційних перенапруг, підключення ОПН виконується паралельно лінії (рис. 2.2.4) [5].

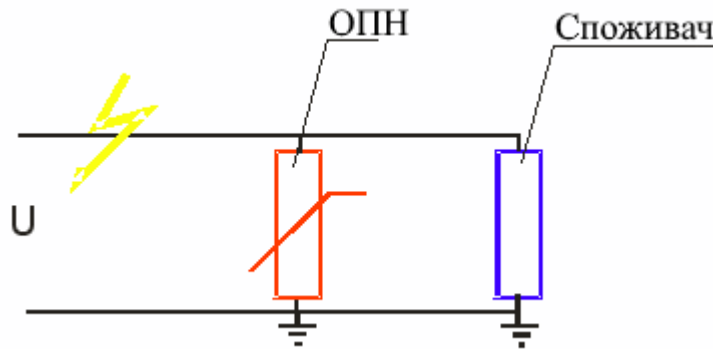


Рис. 2.2.3. Схема підключення ОПН паралельно лінії [5].

Оскільки розрахунок перехідного процесу на ізоляції електроустаткування станції чи підстанції, захищеної тим або іншим ОПН при грозових перенапругах, без використання програмного забезпечення, практично неможливий. Тому майже одразу після виходу ОПН на ринок почалися пошуки способів моделювання характеристик ОПН на персональних комп'ютерах. Тому потрібна належна модель ОПН, яка б враховувала складність перехідних процесів, що відбуваються при ураженні лінії блискавкою.

### 2.3. Динамічні (частотно-залежні) моделі ОПН

Обмежувач напруг нелінійний представляє собою структуру, що складається з легованих кристалів оксиду певного металу та напівпровідникових бар'єрів з оксидів інших металів. Вольт-амперна характеристика ОПН володіє такою нелінійністю, що при збільшенні напруги в два рази, струм через ОПН збільшується на декілька порядків.

Даний факт дозволяє використовувати даний апарат для обмеження перенапруг, в електричних мережах. Для оцінки ефективності різних способів

обмеження перенапруг, місць установки ОПН, потрібно проводити моделювання процесів, пов'язаних з його роботою [28].

Від самого початку обмежувачі перенапруг нелінійні моделювалися як нелінійний резистор. Оскільки вольт-амперна характеристика ОПН при грозових та комутаційних перенапругах відрізняється. Тому постало питання про створення схем заміщення та моделей обмежувачів перенапруг.

Динамічні характеристики ОПН були описані в кінці 1970-х років. З тих пір були розроблені моделі для оцінки частотно-залежної характеристики [29].

Динамічні частотно-залежні моделі ОПН показані на рис. 2.3.1. Модель ОПН, зображена на рис. 2.3.1-а вперше була запропонована в [30], а пізніше вдосконалена в [31]. Моделі ОПН показані на рис. 2.3.1-б, рис. 2.3.1-в, рис. 2.3.1-г являють собою спрощені моделі.

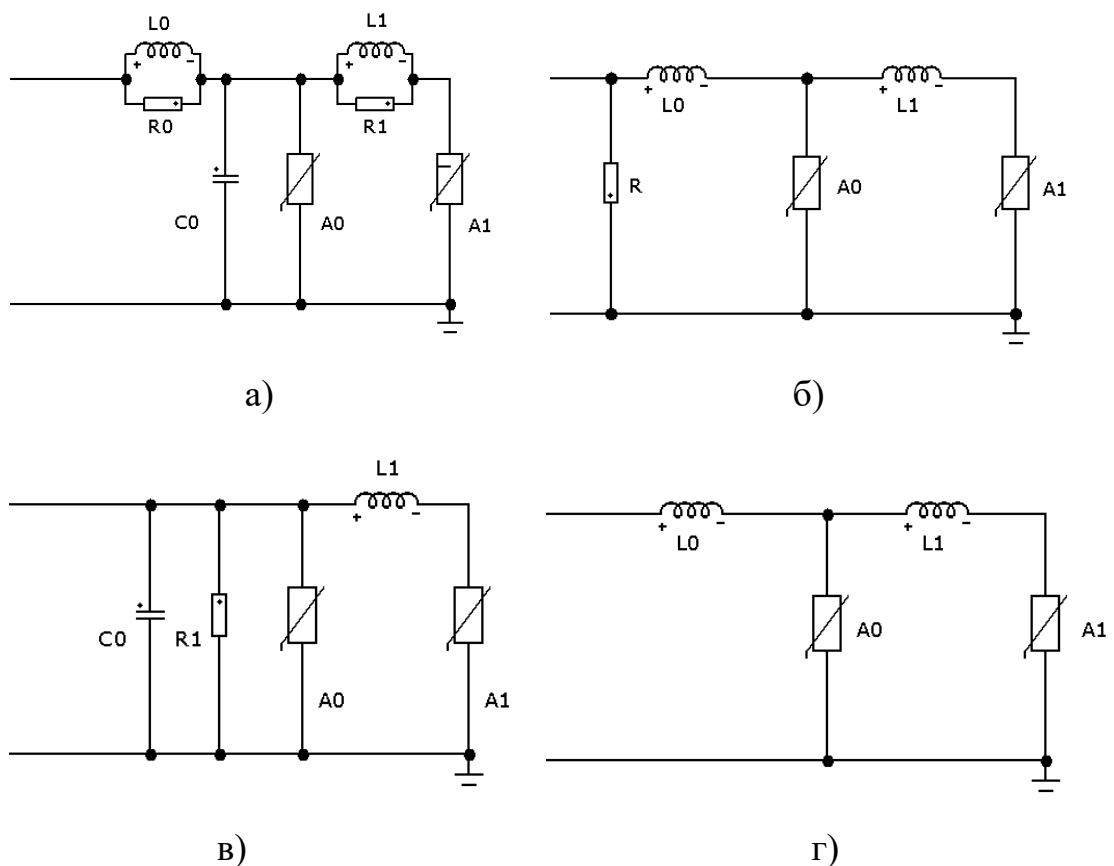


Рис. 2.3.1. Динамічні моделі нелінійного обмежувача перенапруг:

а - повна модель 1992 [32]; б - спрощена модель 1999 [33];

в - спрощена модель 2001 [34]; г - спрощена модель 2004 [35].

Модель ОПН повинна бути реалізована в тій чи іншій програмі схемотехнічного моделювання. В даному дослідженні вибрано програму демонстраційну (студентську) версію Micro-Cap Evaluation/Student Version [36]. Способи моделювання ОПН в демонстраційній версії Micro-Cap 11 викладена в [14-15].

#### 2.4. Вибір захисного рівня обмежувачів перенапруг нелінійних

Для очікуваних перенапруг, які можуть виникати в системі під час нормальної роботи, захисні характеристики пристрою захисту від перенапруг а повинні бути набагато нижче рівня захисту обладнання у всіх точках. Це основний параметр перенапруги, що визначає його захисний рівень. Це напруга, яка з'явиться на клеммах розрядника, а отже, і на обладнанні, що захищається під час розряду струму внаслідок перенапруги напруги. Він повинен бути значно нижче рівня захисту обладнання, що захищається.

Щоб визначити це, розглянемо просту схему живлення на рисунку 2.4, де

$Z_1$  - опір напруги лінії, по якій з'єднано обладнання, що захищається від джерела живлення аж до розрядника,  $Z_2$  - опір обладнання,  $Z_t$  - опір розрядника

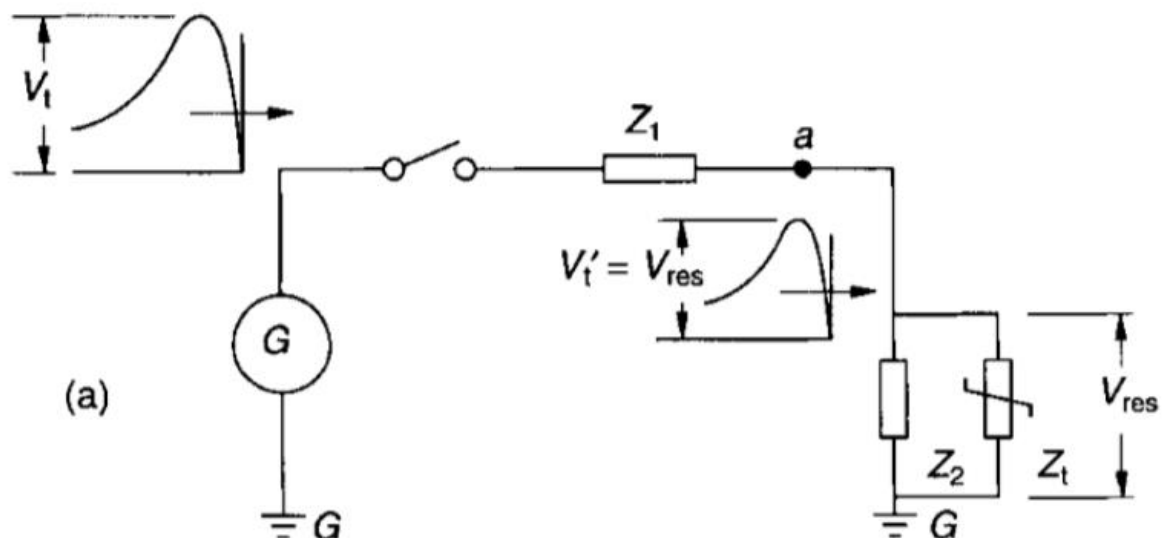


Рис. 2.3.1

$$I = \frac{E}{Z_3 + \frac{1}{\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2}}} = \frac{E}{Z_3 + \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2}}$$

$$E_1 = \frac{E * Z_3}{Z_3 + \frac{Z_1 * Z_2}{Z_1 + Z_2}}$$

При появі сплеску напруги розрядник почне проводити при певній напрузі певний розрядний струм. Напруга, при якій розпочнеться провідність, є рівнем захисного імпульсу розрядника і називається залишковою напругою ( $V_{res}$ ) розрядника. Виробник визначає для кожного конкретного розрядника встановлення рівня захисту.

$$I_p = \frac{V_t - V_{res}}{Z_s}$$

Де  $V_t$  – потенційна напруга розряду,  $V_{res}$  – залишкова напруга,  $Z_s$  – еквівалентний опір кола.

Двигуни мають порівняно нижчий рівень захисту, але вони не підключені безпосередньо на зовнішній повітряній лінії зв'язку, а також розумно екрановані лінійним трансформатором, розподільним пристроєм та кабелями. Комутаційні пристрої та системи шин, які можуть бути або не бути захищеними як двигуни, мають порівняно більш високий рівень захисту, ніж двигуни.

## 2.5. Висновки по розділу 2

На сьогодні для захисту ліній та підстанцій від грозових та комутаційних перенапруг оптимальним рішенням буде використання нелінійних обмежувачів перенапруг. Ефективність захисту за допомогою ОПН в різних мережах помітно залежить від вибору апарата з оптимальними характеристиками для тої чи іншої лінії, в залежності від класу напруги.

Схема достатнього грозозахисту, за допомогою ОПН, від хвиль набігаючих з лінії включає:

- трифазні комплекти ОПН, встановлених на кожній системі збірних шин якомога ближче до трансформаторів та іншого обладнання;
- надійний захист підходів до підстанції всіх ліній з малим захисним кутом тросів і заземленням кожної опори;
- додаткові ОПН біля трансформаторів віддалених від збірних шин, або шунтуючих реакторів, встановлених зі сторони лінії;
- додаткові ОПН, встановлені на лініях з дерев'яними опорами на початку підходу з грозозахисними тросами та біля лінійного вимикача.

Основною метою схемотехнічного моделювання обмежувачів перенапруг полягає в тому аби правильно відтворити реальні умови роботи ОПН при грозових та комутаційних перенапруг, збільшити точність та полегшити процес розрахунку його параметрів. На сьогодні представлено чотири найпоширеніші моделі ОПН, що показують реальні схеми заміщення даного апарата.

Для перевірки схем грозозахисту необхідно виконувати схемотехнічне моделювання. Щоб поровести таке моделювання потрібна модель ОПН, яка б відображала динамічний характер його вольт-амперної характеристики.

### 3. СХЕМОТЕХНІЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СХЕМ ЗАХИСТУ ПІДСТАНЦІЙ ВІД ПЕРЕНАПРУГ ЗА ДОПОМОГОЮ ОПН В MICRO-CAP EVALUATION VERSION.

#### 3.1. Модель ОПН в Micro-Cap 11 Evaluation Version.

Для моделювання схем захисту підстанції спроектуємо в програмі Micro-Cap 11 Evaluation Version нелінійний обмежувач перенапруг (рис. 3.1.1), згідно з інструкціями по використанню програмного забезпечення [6].

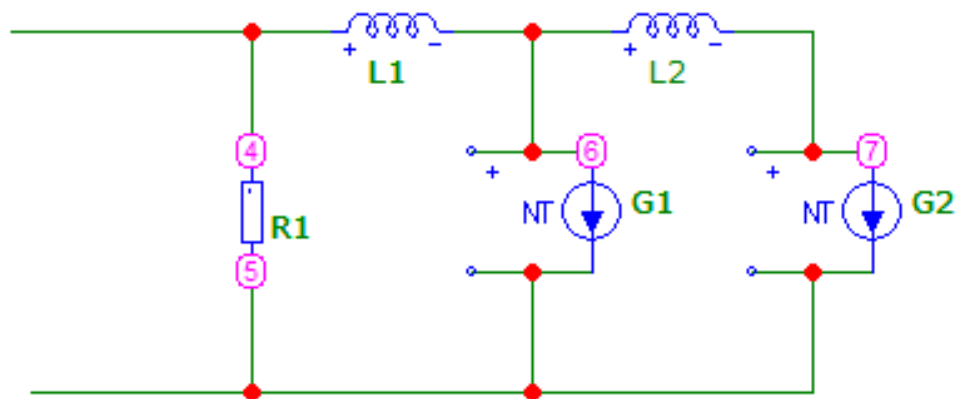


Рис. 3.1.1. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг.

На рис. 3.1 R1 – активний параметр схеми; L1, L2 – індуктивні параметри схеми; G1, G2 – нелінійні параметри схеми (керовані напругою джерела струму).

Параметри індуктивності на даній схемі було визначено на основі даних (табл. 3.1), взятих з каталогу [7], за формулами (3.1) та (3.2) [8]:

$$L_1 = \frac{1}{12} \times \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \times V_n \quad (3.1)$$

$$L_2 = \frac{1}{4} \times \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \times V_n \quad (3.2)$$



де  $V_n$  – номінальна напруга апарата (кВ);  $V_{r1/20}$  – залишкова напруга (кВ) при струмі 10 кА та хвилі 1/20 мкс;  $V_{r8/20}$  – залишкова напруга (кВ) при струмі 10 кА та хвилі 8/20 мкс.

Таблиця 3.1

Maximum System Voltage Um  kV	Duty cycle voltage Ur  kV	MCOV  kV	Energy rating Class	Max. Ures tested with current wave									Normalized FOW discharge voltage (1/20 μs)	
				Switching impulse discharge voltage (45/90 μs)				Normalized lightning impulse discharge voltage (8/20 μs)						
				250 A kV	500 A kV	1000 A kV	2000 A kV	1.5 kA kV	3 kA kV	5 kA kV	10 kA kV	20 kA kV	5 kA kV	10 kA kV
121	120	98.0	E	225	233	239	251	-	-	271	288	317	-	314

Рис.3.1.2. Характеристики необхідні для моделювання ОПН.

Розрахунок індуктивностей ОПН за даними каталогу та формулами (3.1) та (3.2)

$$L_1 = \frac{1}{12} \times \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \times V_n = \frac{1}{12} \times \frac{314 - 288}{314} \times 120 = 0.828 \text{ (мкГн)}$$

$$L_1 = \frac{1}{4} \times \frac{V_{r1/20} - V_{r8/20}}{V_{r8/20}} \times V_n = \frac{1}{12} \times \frac{314 - 288}{314} \times 120 = 2.484 \text{ (мкГн)}$$

3.2. Дослідження впливу відстані між нелінійним обмежувачем перенапруг та об'єкту, що захищається від впливу перенапруг.

Спроекуємо схему захисту підстанції від грозових перенапруг (повного імпульсу та зрізаного)

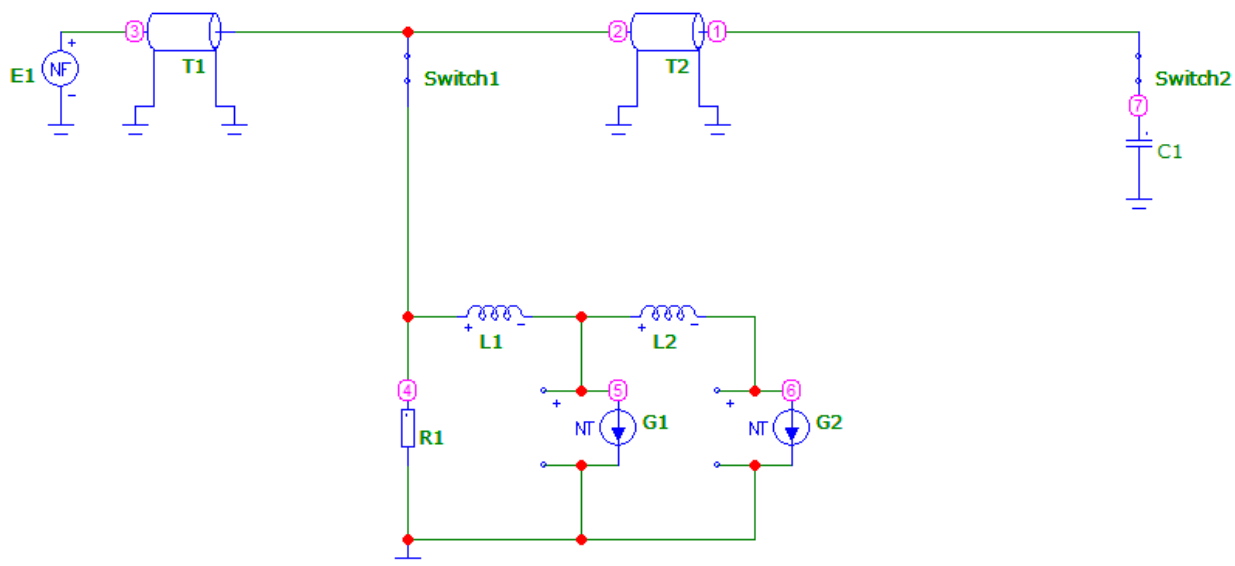


Рис. 3.1.3. Моделювання в Micro-Cap 11 Evaluation Version схеми захисту підстанції від грозових перенапруг.

Опис імпульсів напруг згідно синтаксису Micro-Cap 11 Evaluation Version (табл 3.2.1)

Таблиця 3.2.1

№	Параметри імпульсу	Опис
1	1.2/50 мкс.	$1.044 \cdot V_m \cdot (\exp(-1.400e4 \cdot t) - \exp(-1.917e6 \cdot t))$
2	100/1000 мкс.	$1.151 \cdot V_m \cdot (\exp(-700 \cdot t) - \exp(-2.3e4 \cdot t))$
3	250/2500 мкс.	$1.151 \cdot V_m \cdot (\exp(-280 \cdot t) - \exp(-9200 \cdot t))$

3.2.1. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 1.2/50 мкс.

Всі графіки, які будуть наведені нижче, є результатом роботи змодельованої схеми (рис. 3.3).

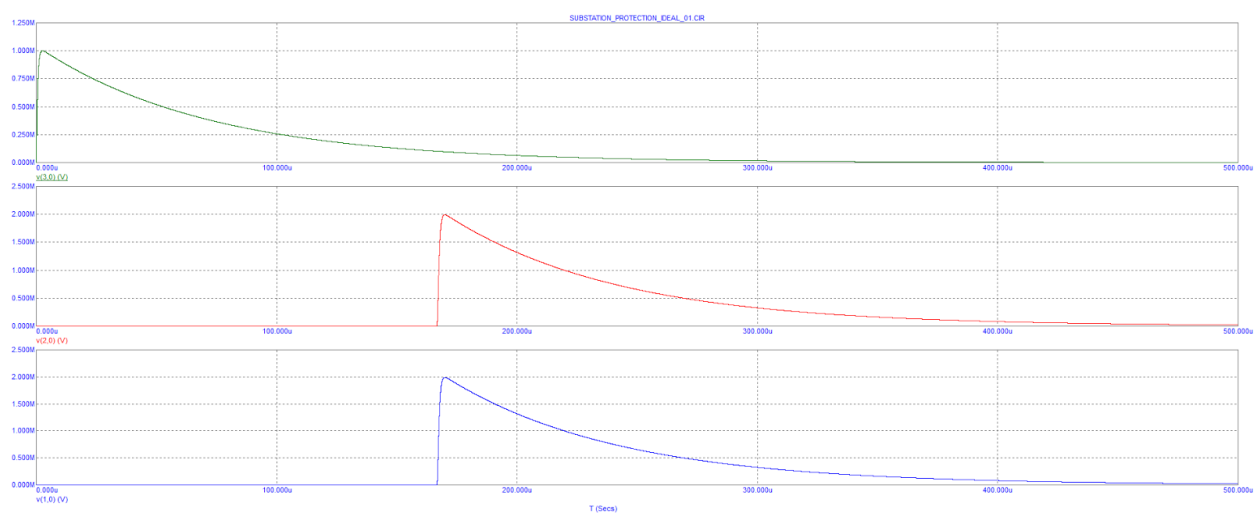


Рис. 3.2.1. Графіки напруг на схемі без ОПН

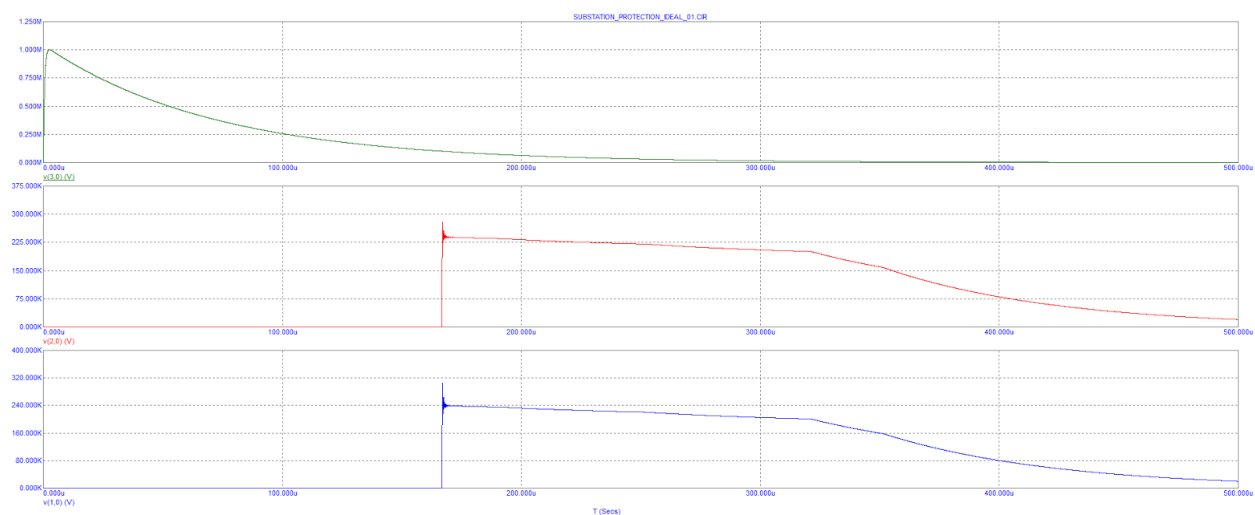


Рис. 3.2.2. Графіки напруг на схемі при відстані 1 м між об'єктом та ОПН.

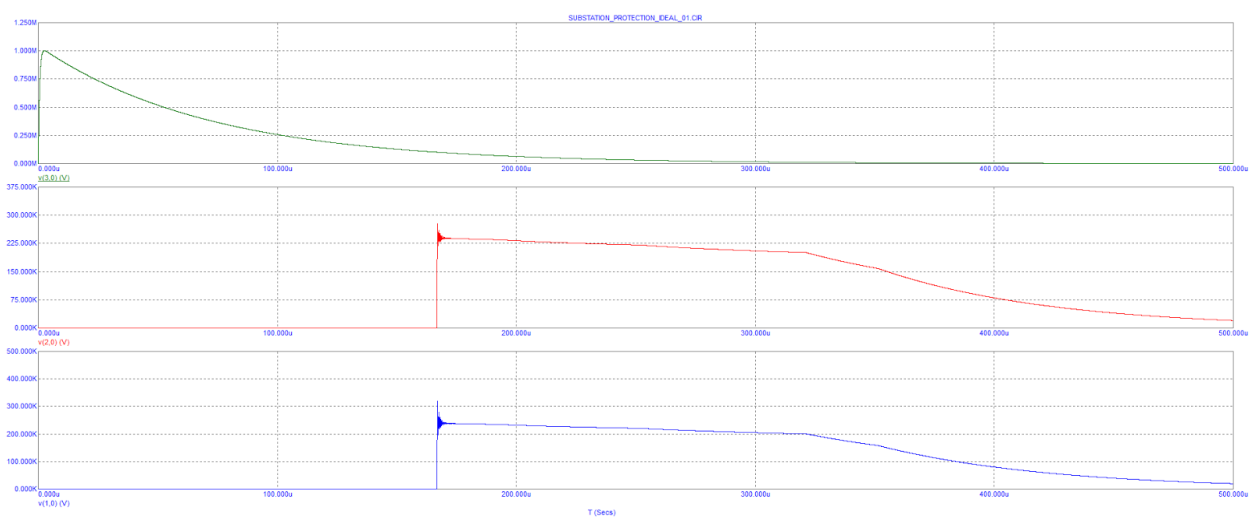


Рис. 3.2.3. Графіки напруг на схемі при відстані 2 м між об'єктом та ОПН.

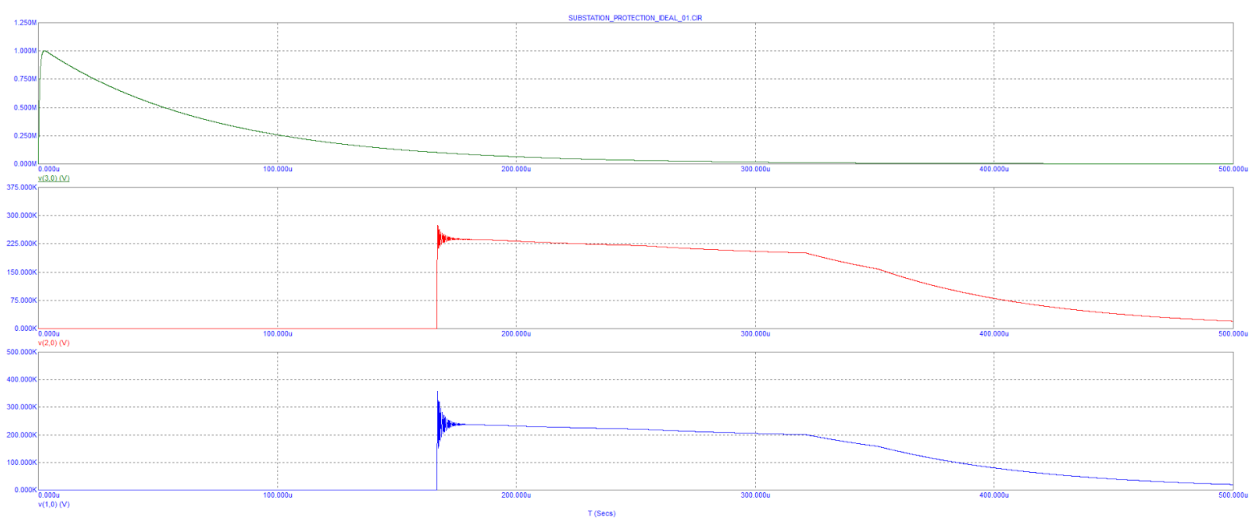


Рис. 3.2.4. Графіки напруг на схемі при відстані 3 м між об'єктом та ОПН.

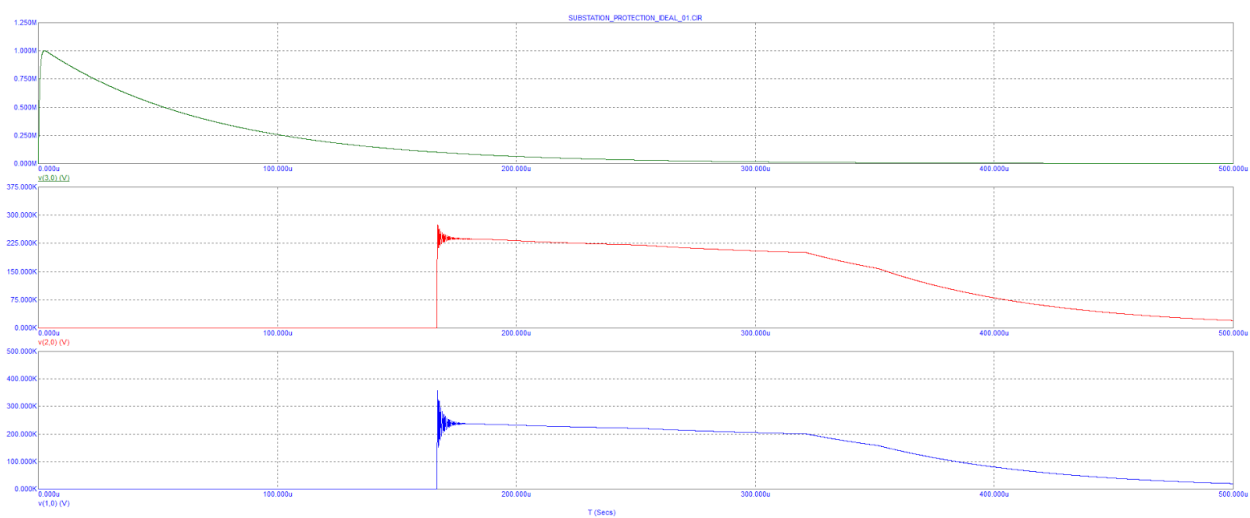


Рис. 3.2.5. Графіки напруг на схемі при відстані 5 м між об'єктом та ОПН.

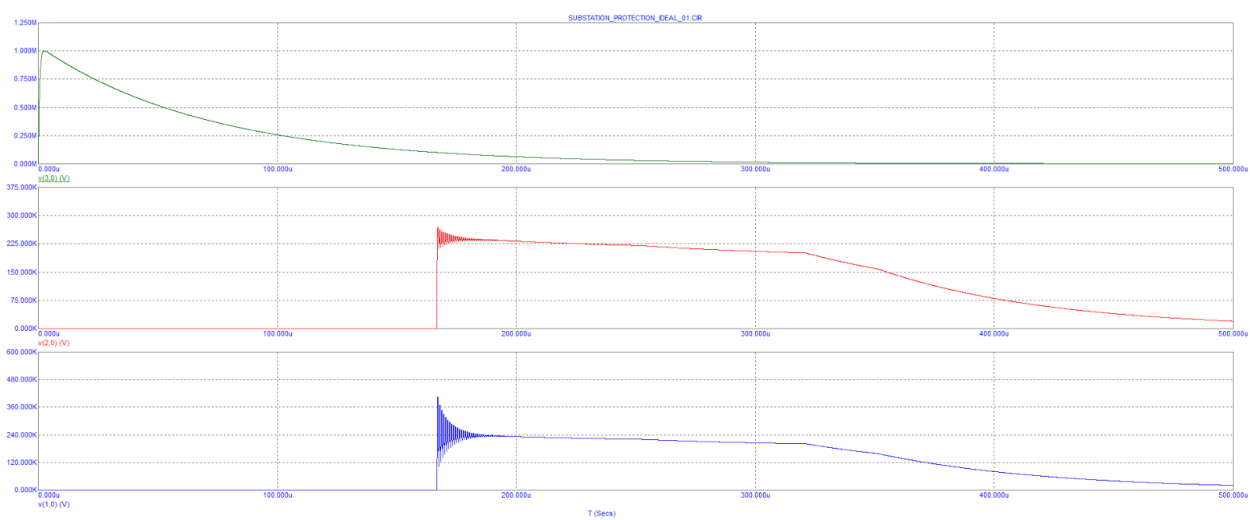


Рис. 3.2.6. Графіки напруг на схемі при відстані 10 м між об'єктом та ОПН.

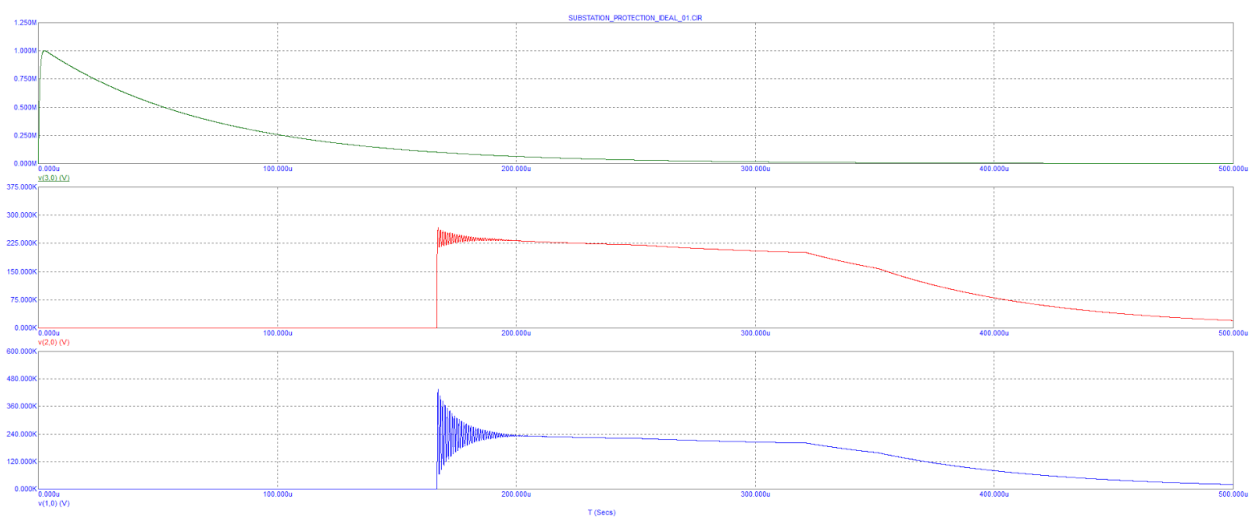


Рис. 3.2.7. Графіки напруг на схемі при відстані 15 м між об'єктом та ОПН.

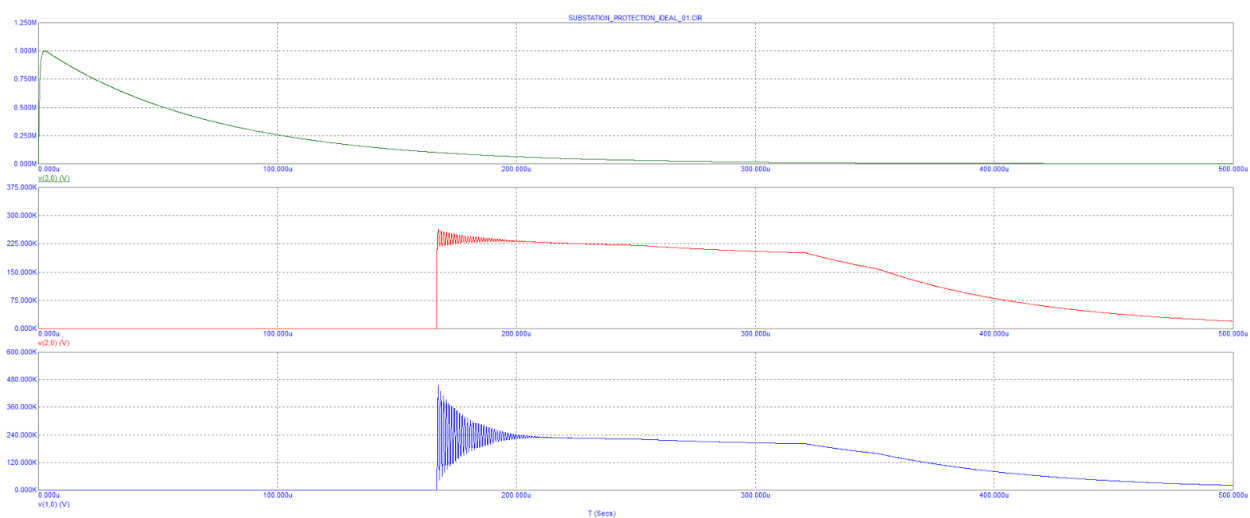


Рис. 3.2.8. Графіки напруг на схемі при відстані 20 м між об'єктом та ОПН.

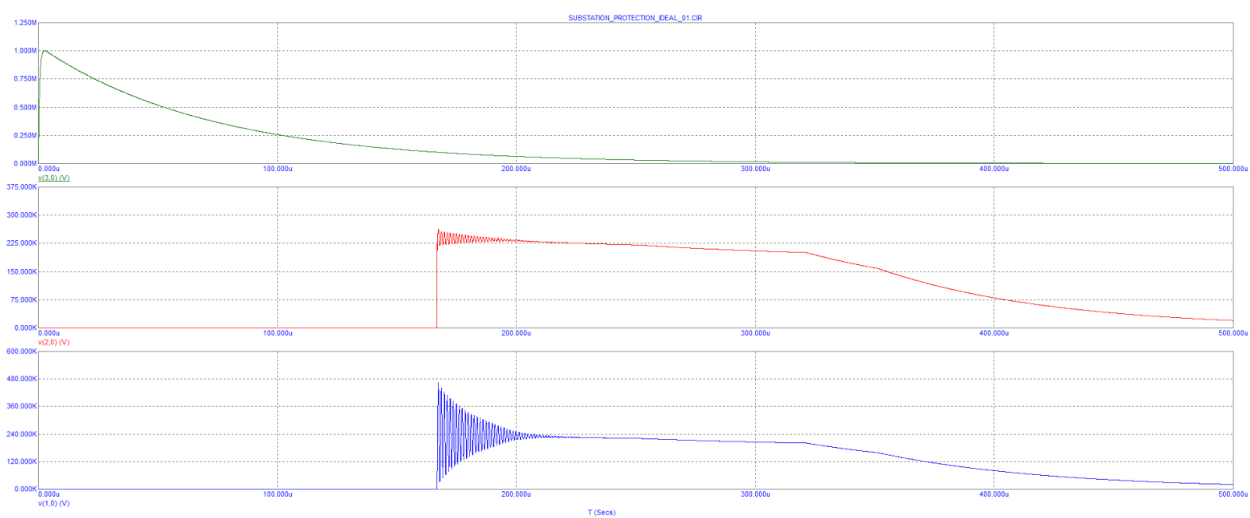


Рис. 3.2.9. Графіки напруг на схемі при відстані 25 м між об'єктом та ОПН.

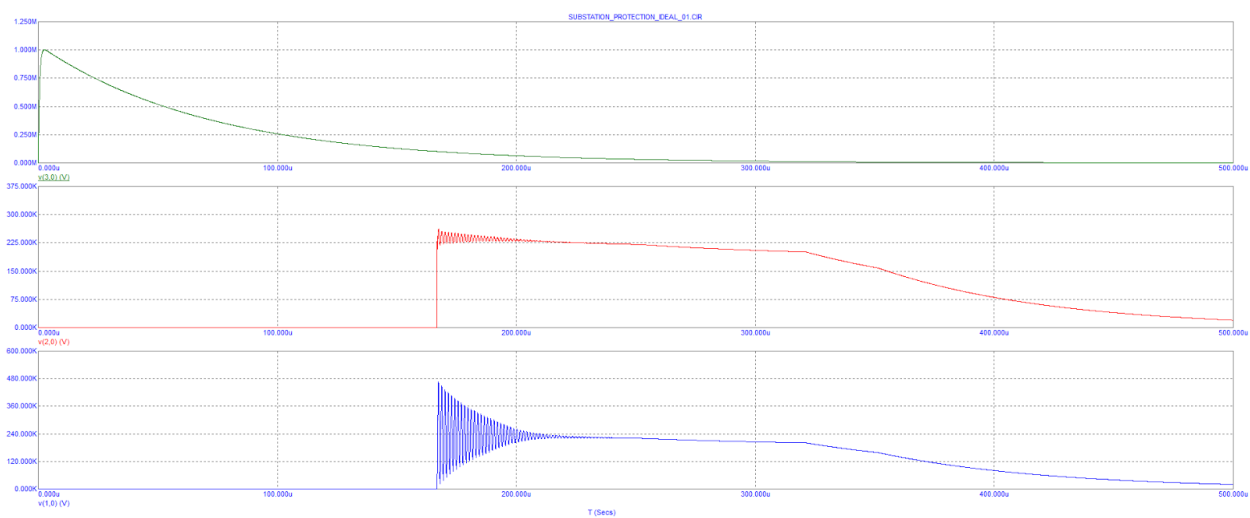


Рис. 3.2.10. Графіки напруг на схемі при відстані 30 м між об'єктом та ОПН.

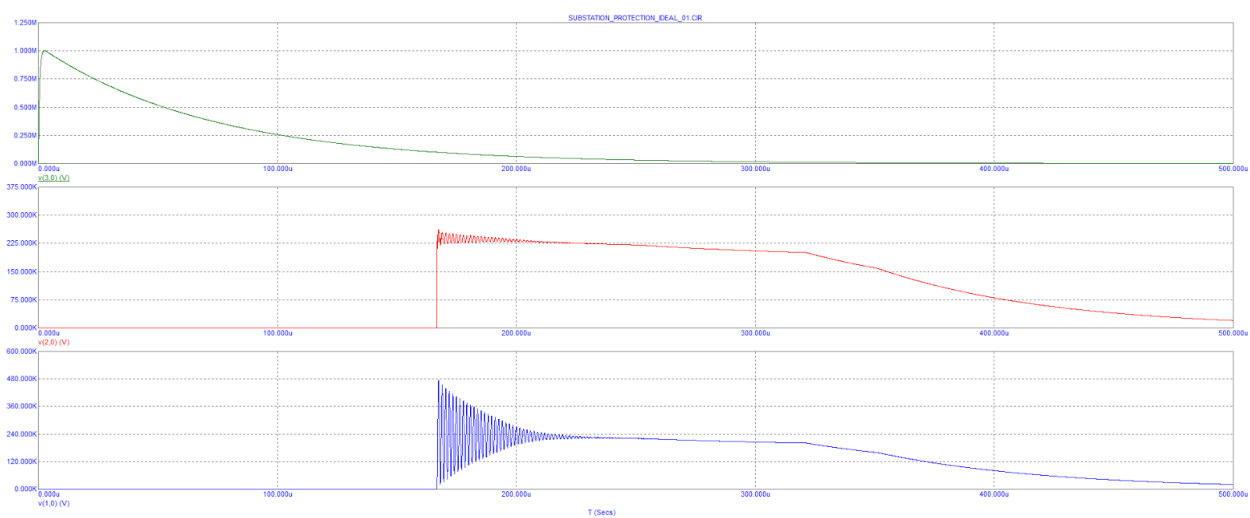


Рис. 3.2.11. Графіки напруг на схемі при відстані 35 м між об'єктом та ОПН.

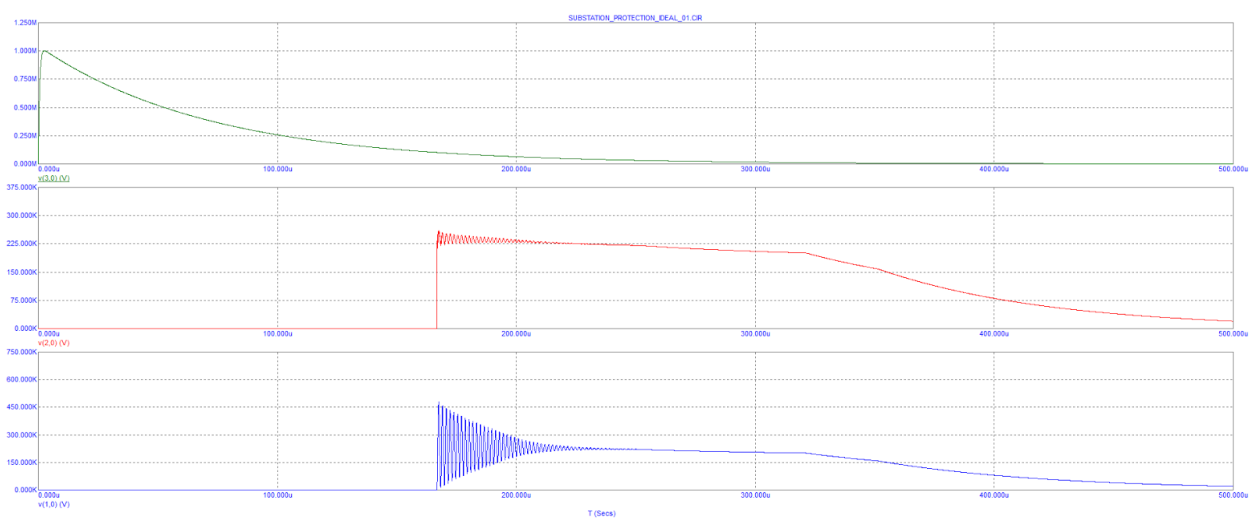


Рис. 3.2.12. Графіки напруг на схемі при відстані 40 м між об'єктом та ОПН.



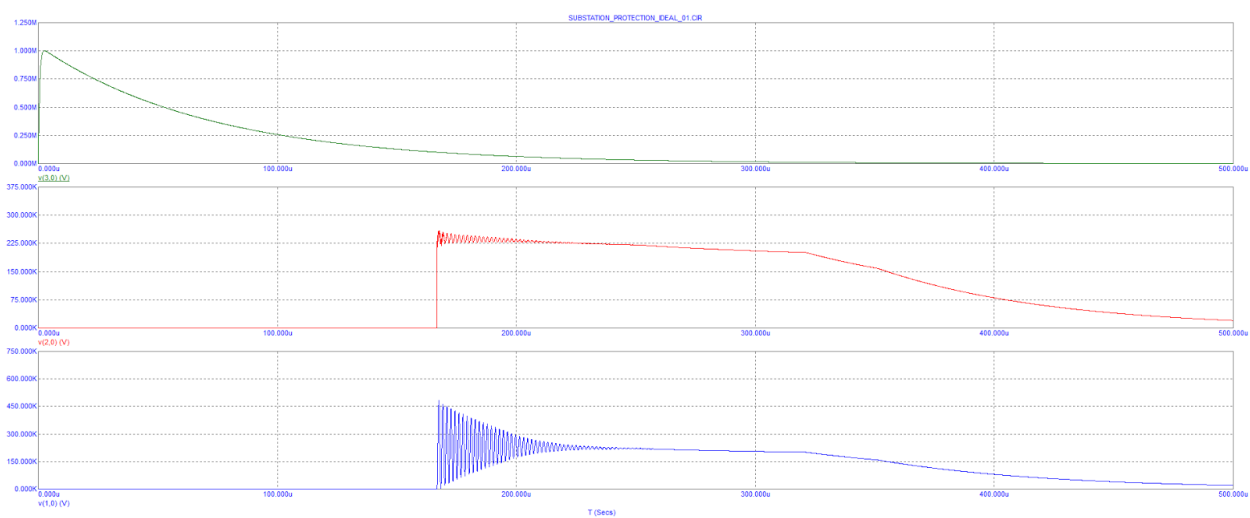


Рис. 3.2.13. Графіки напруг на схемі при відстані 45 м між об'єктом та ОПН.

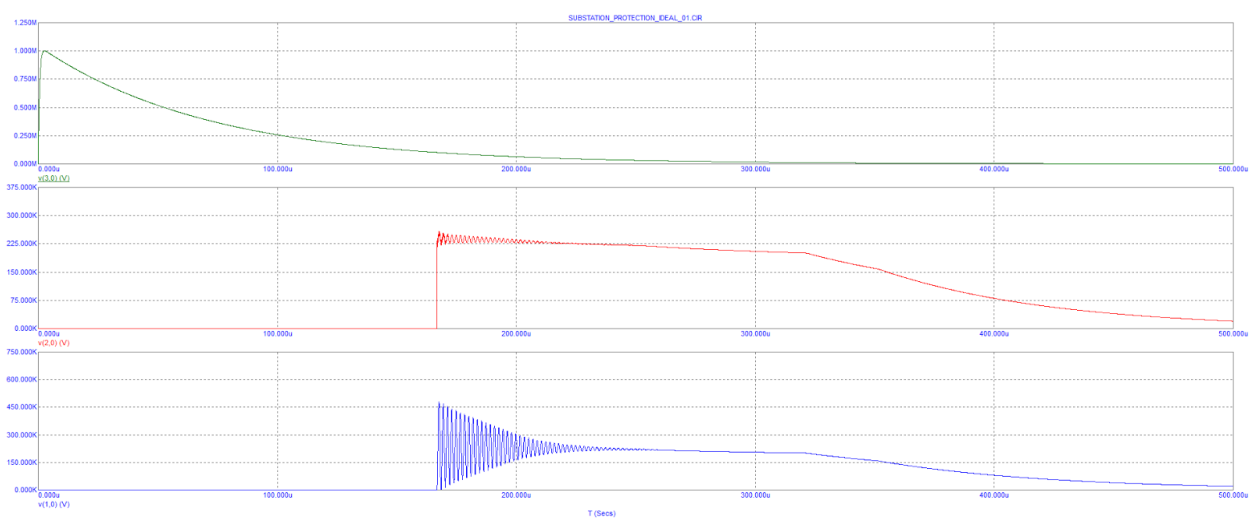


Рис. 3.2.14. Графіки напруг на схемі при відстані 50 м між об'єктом та ОПН.

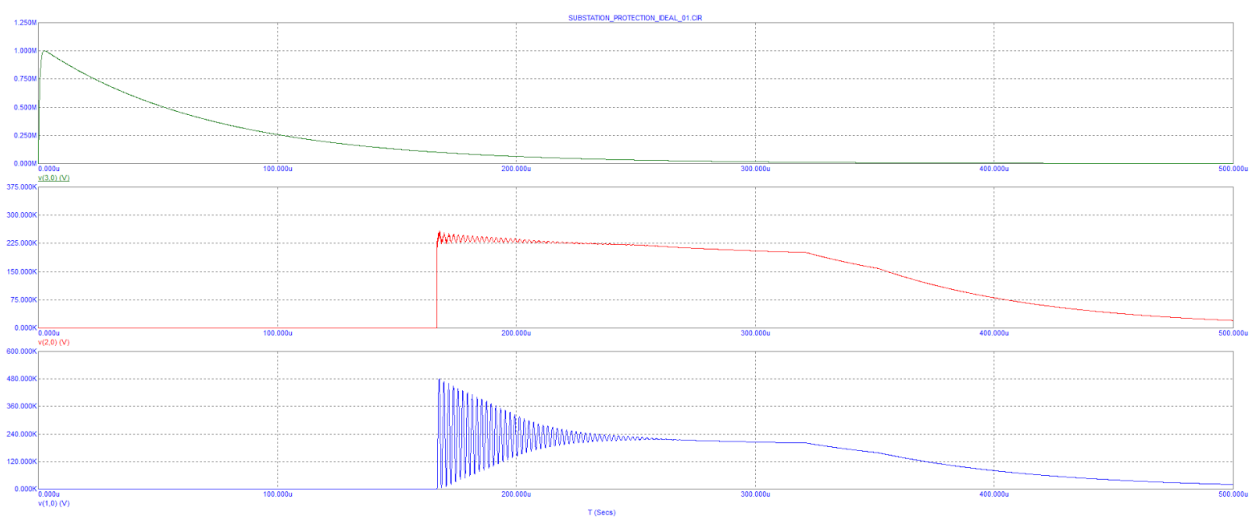


Рис. 3.2.15. Графіки напруг на схемі при відстані 60 м між об'єктом та ОПН.

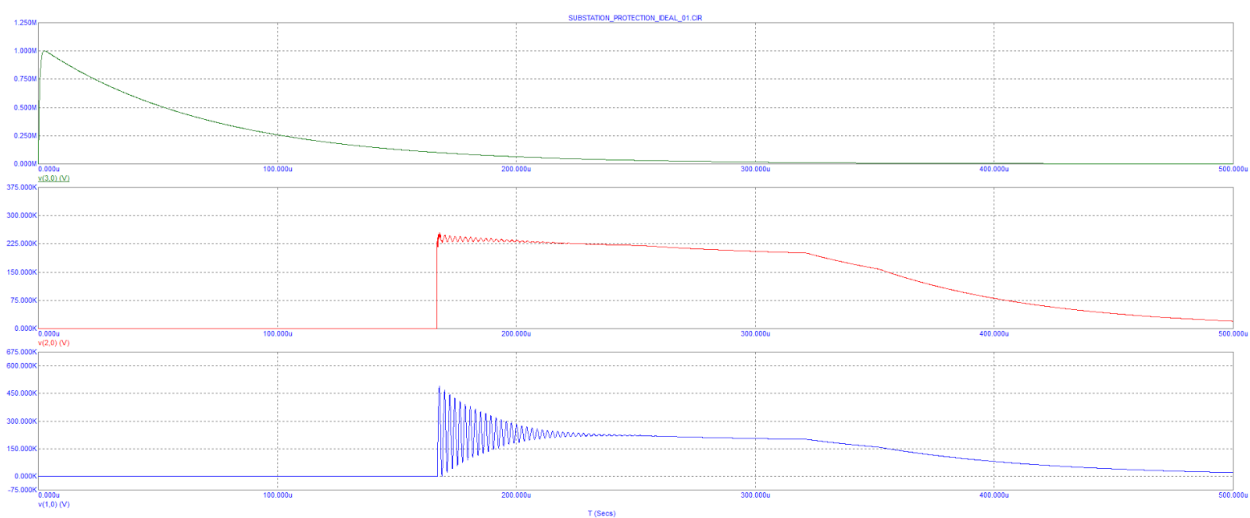


Рис. 3.2.16. Графіки напруг на схемі при відстані 70 м між об'єктом та ОПН.

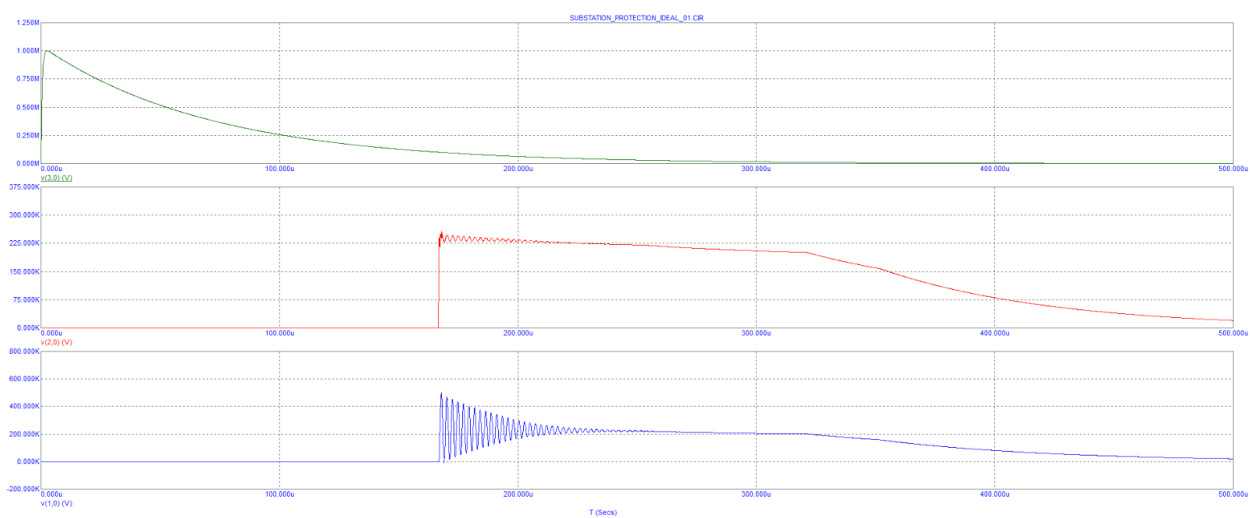


Рис. 3.2.17. Графіки напруг на схемі при відстані 80 м між об'єктом та ОПН.

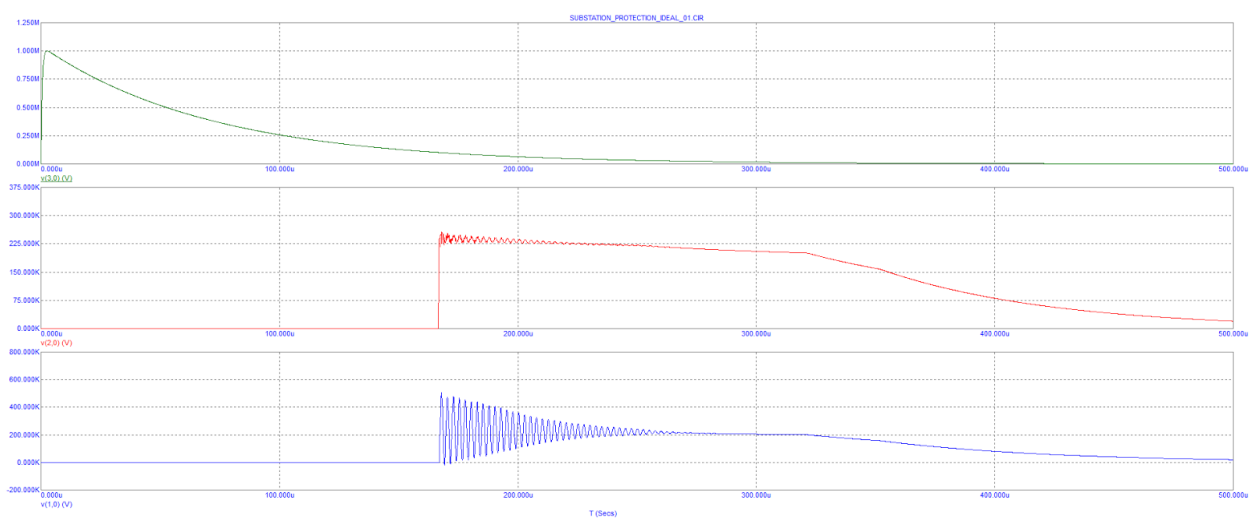


Рис. 3.2.18. Графіки напруг на схемі при відстані 90 м між об'єктом та ОПН.

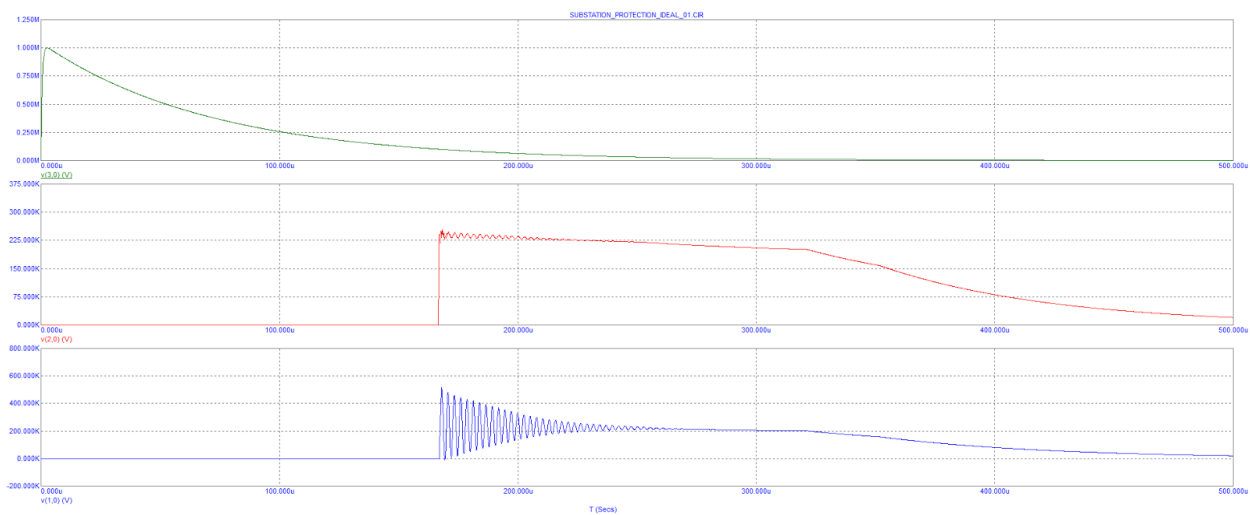


Рис. 3.2.19. Графіки напруг на схемі при відстані 100 м між об'єктом та ОПН.

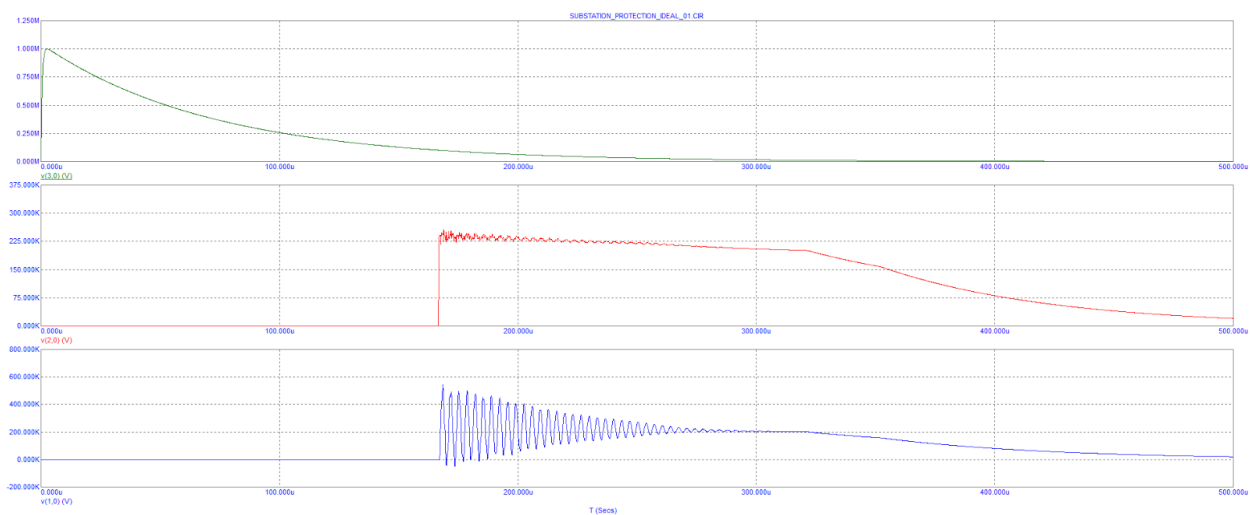


Рис. 3.2.20. Графіки напруг на схемі при відстані 150 м між об'єктом та ОПН.

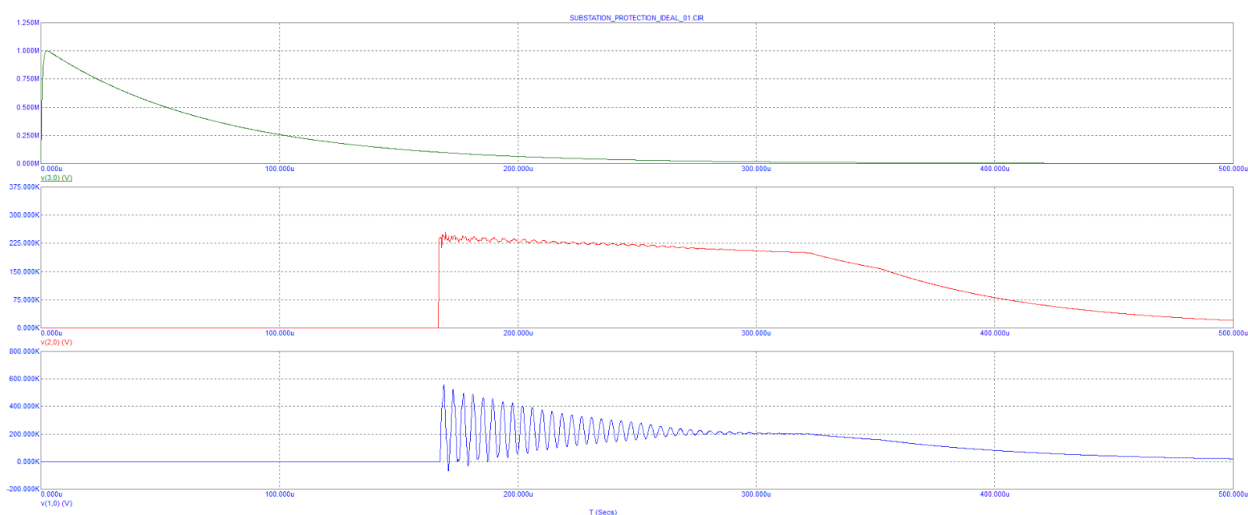


Рис. 3.2.21. Графіки напруг на схемі при відстані 200 м між об'єктом та ОПН.

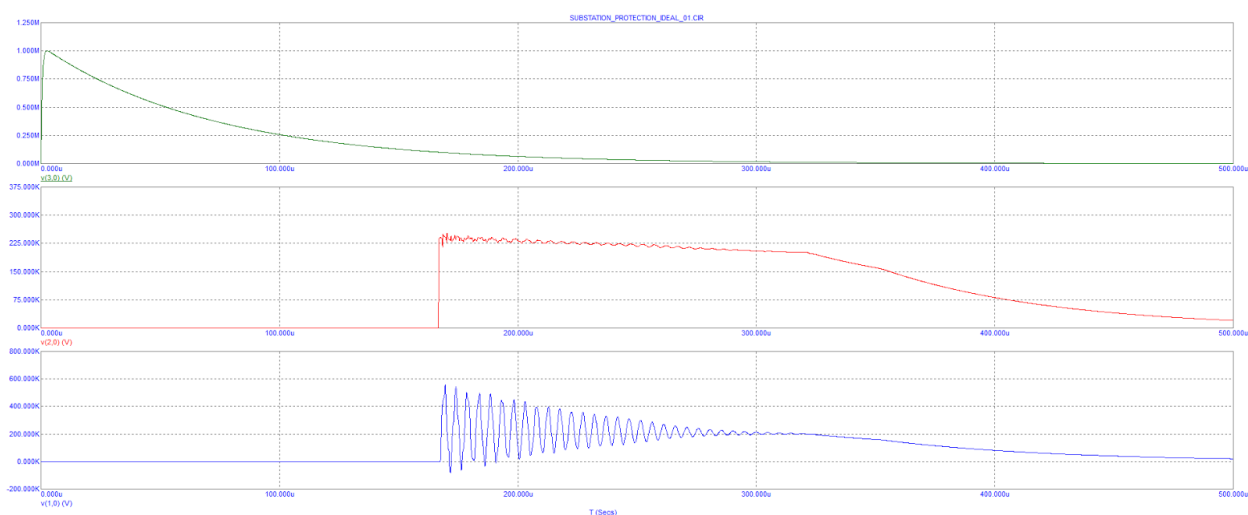


Рис. 3.2.22. Графіки напруг на схемі при відстані 250 м між об'єктом та ОПН.

### 3.2.2. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 100/1000 мкс.

Параметри схеми залишаються незмінними згідно з рис. 3.3 окрім значення імпульсу.

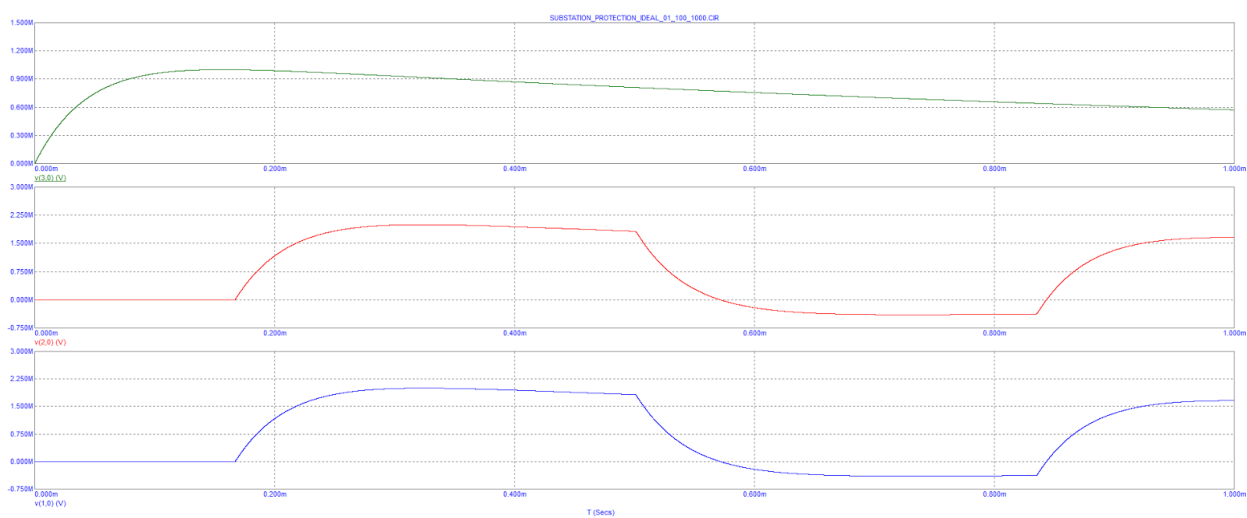


Рис. 3.2.23. Графіки напруг на схемі без ОПН

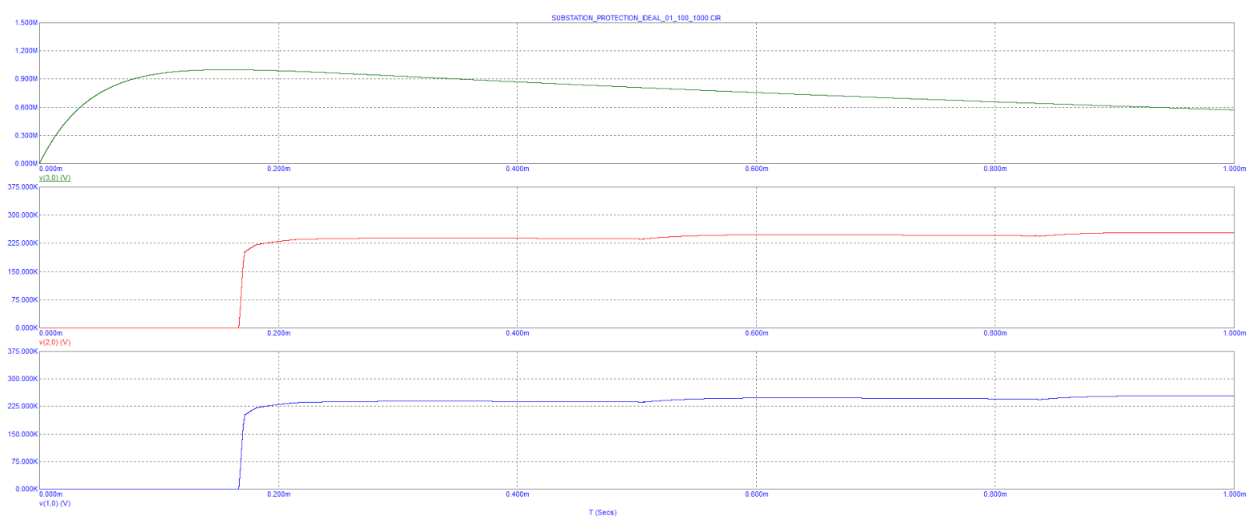


Рис. 3.2.24. Графіки напруг на схемі при відстані 1м між об'єктом та ОПН.

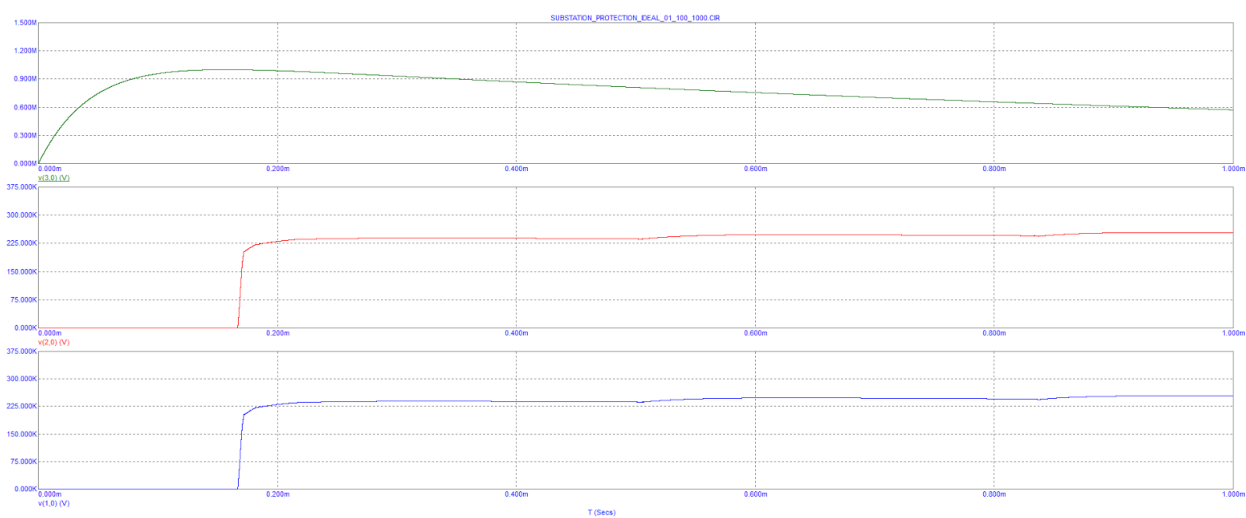


Рис. 3.2.25. Графіки напруг на схемі при відстані 2м між об'єктом та ОПН

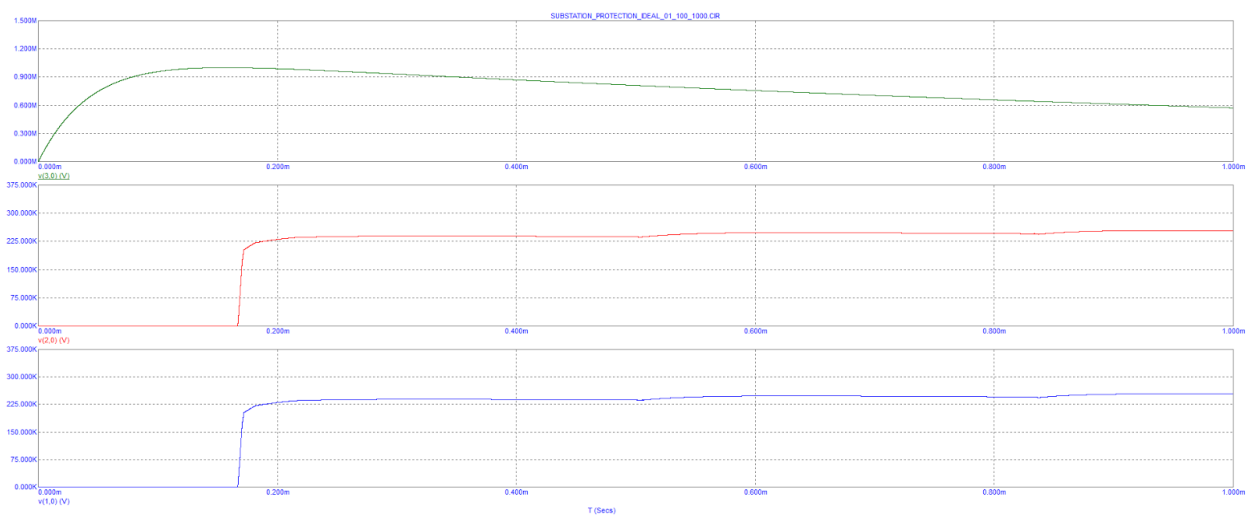


Рис. 3.2.26. Графіки напруг на схемі при відстані 3м між об'єктом та ОПН

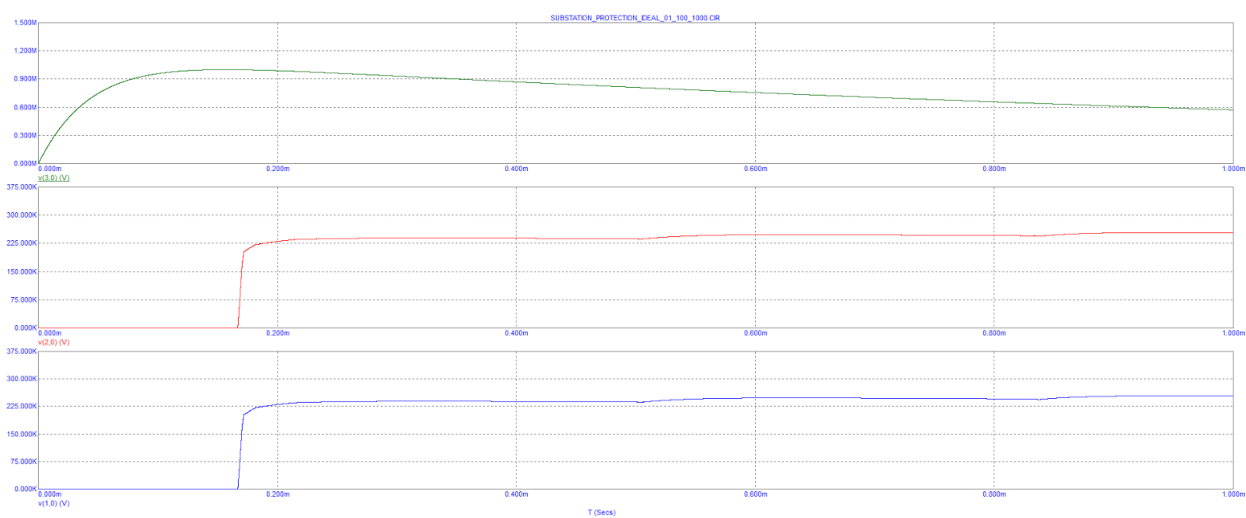


Рис. 3.2.27. Графіки напруг на схемі при відстані 4м між об'єктом та ОПН

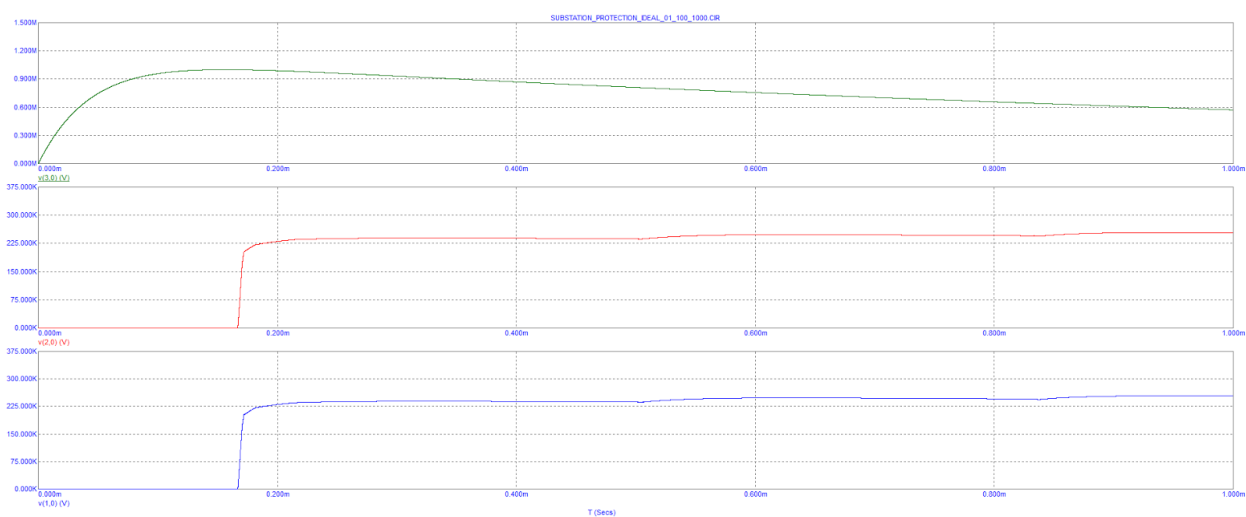


Рис. 3.2.28. Графіки напруг на схемі при відстані 5м між об'єктом та ОПН



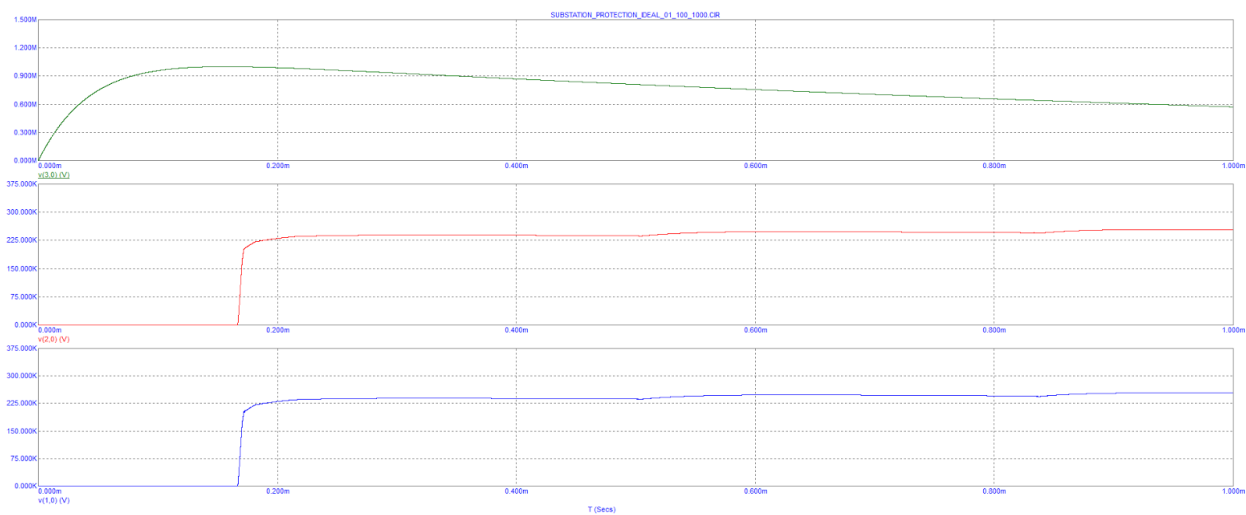


Рис. 3.2.29. Графіки напруг на схемі при відстані 10м між об'єктом та ОПН

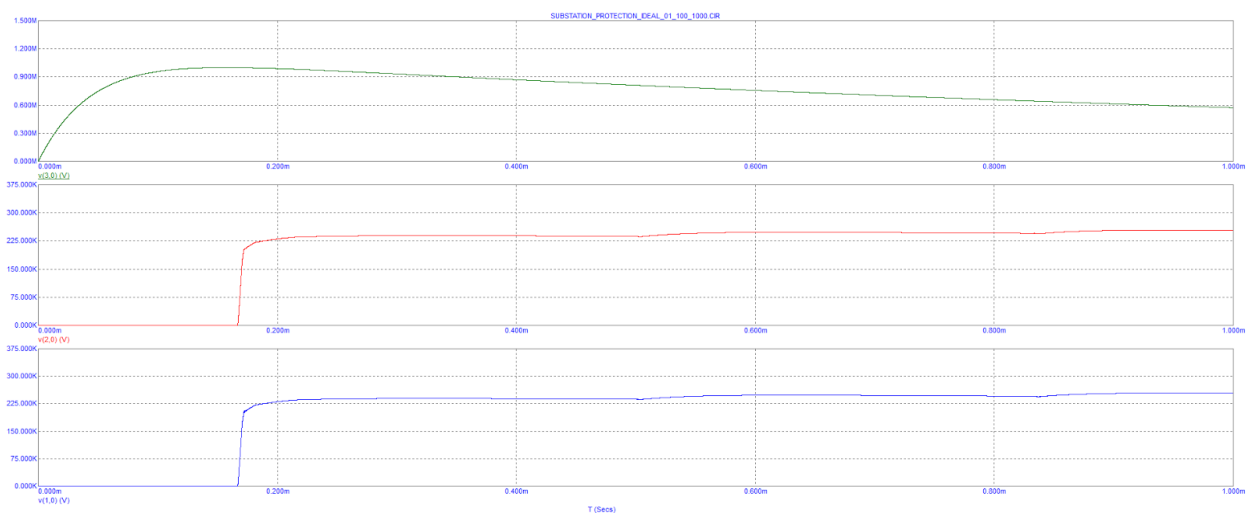


Рис. 3.2.30. Графіки напруг на схемі при відстані 15м між об'єктом та ОПН

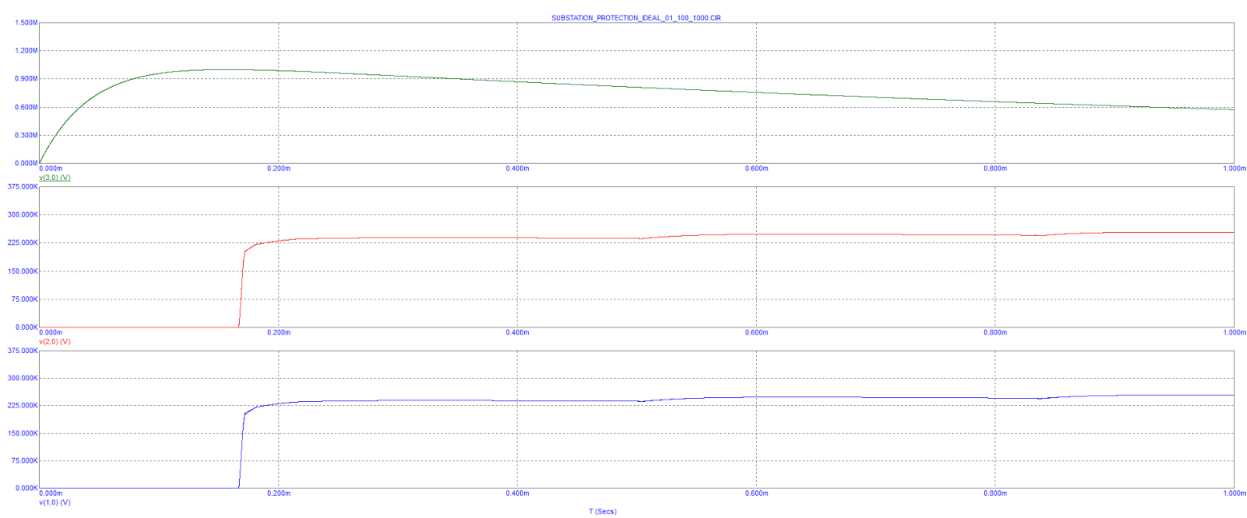


Рис. 3.2.31. Графіки напруг на схемі при відстані 20м між об'єктом та ОПН

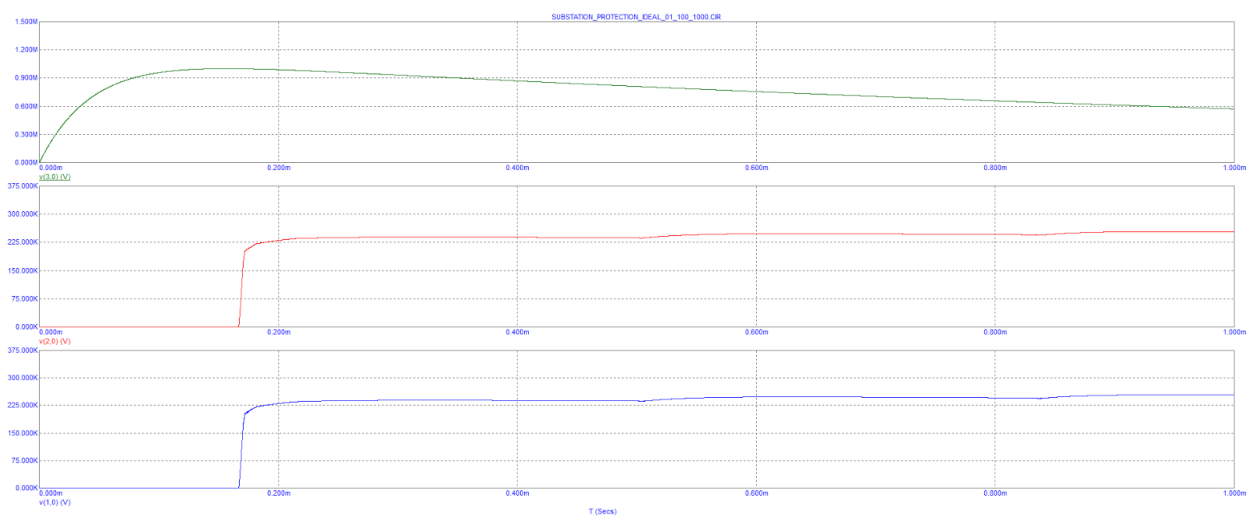


Рис. 3.2.33. Графіки напруг на схемі при відстані 25м між об'єктом та ОПН

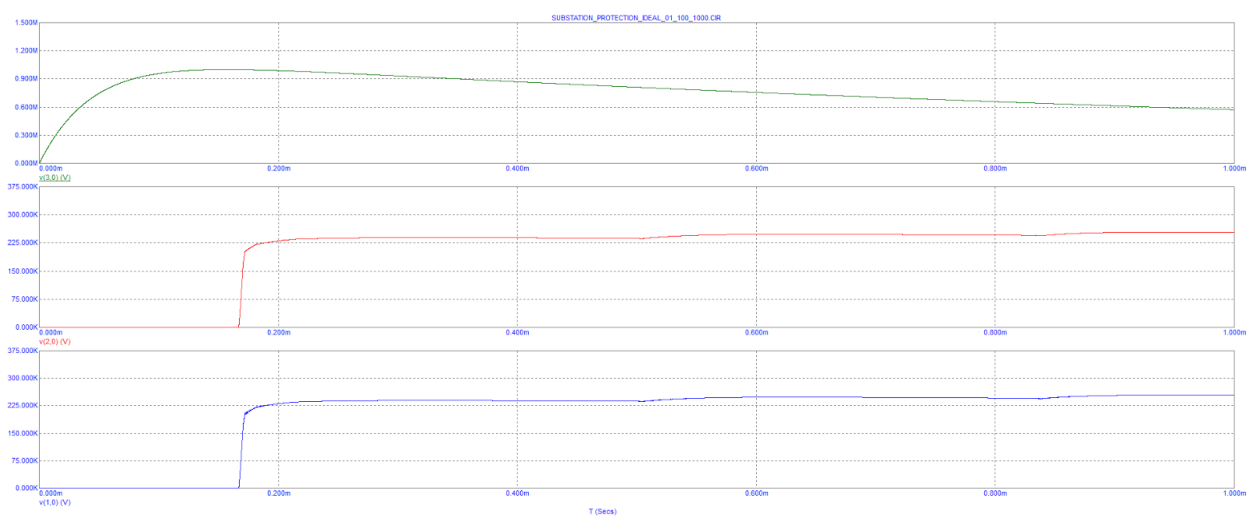


Рис. 3.2.34. Графіки напруг на схемі при відстані 30м між об'єктом та ОПН

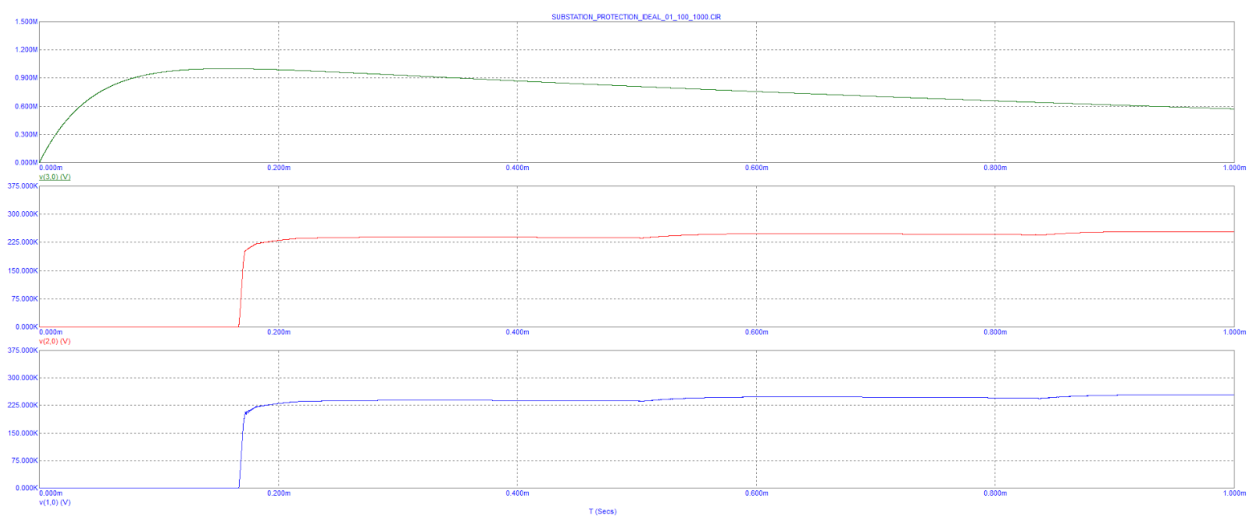


Рис. 3.2.35. Графіки напруг на схемі при відстані 35м між об'єктом та ОПН

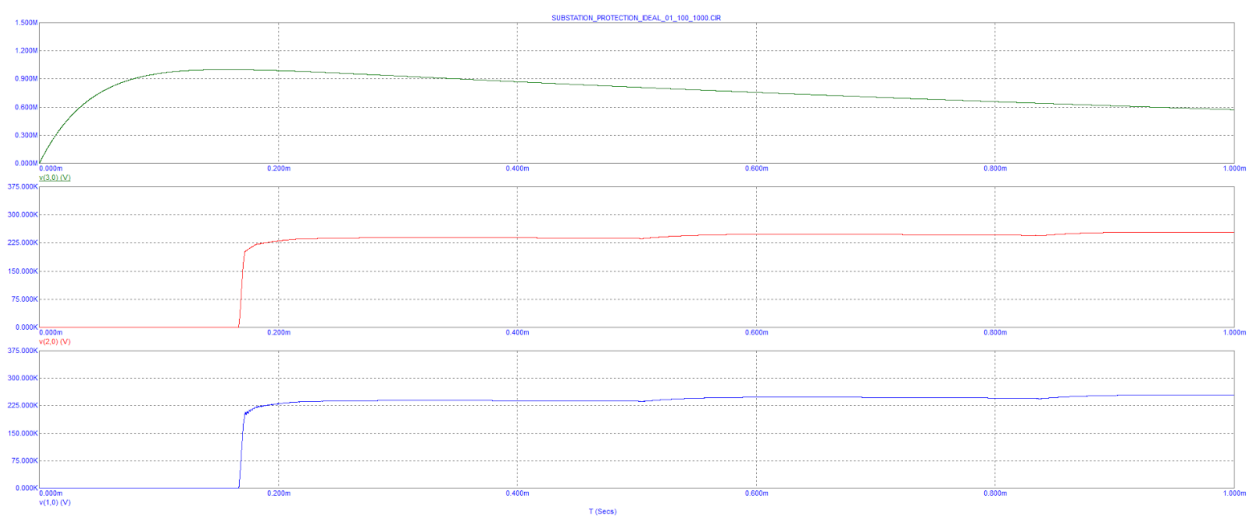


Рис. 3.2.36. Графіки напруг на схемі при відстані 40м між об'єктом та ОПН

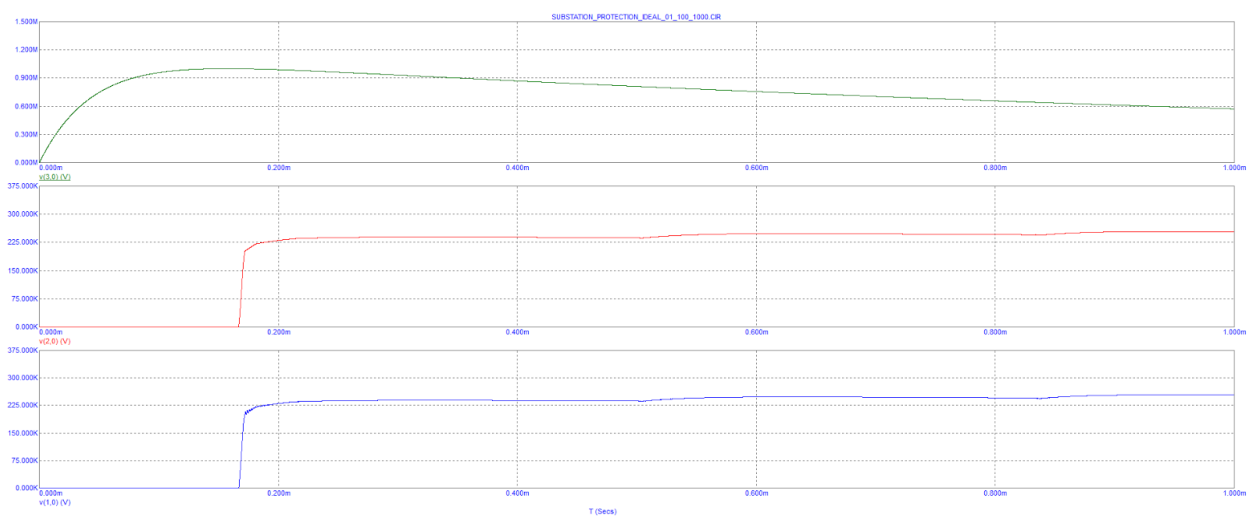


Рис. 3.2.37. Графіки напруг на схемі при відстані 45м між об'єктом та ОПН

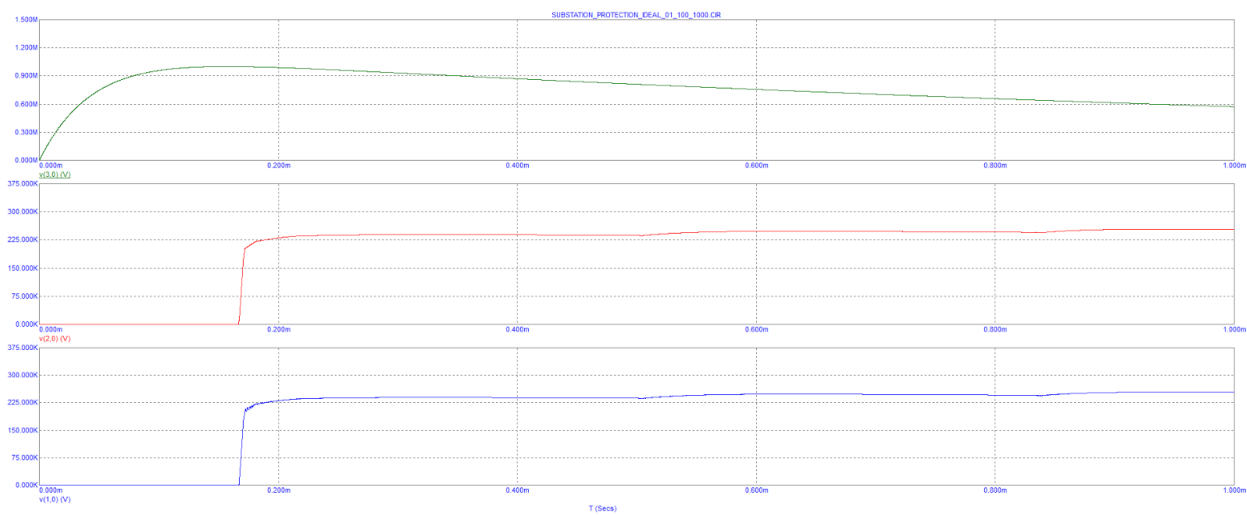


Рис. 3.2.38. Графіки напруг на схемі при відстані 50м між об'єктом та ОПН

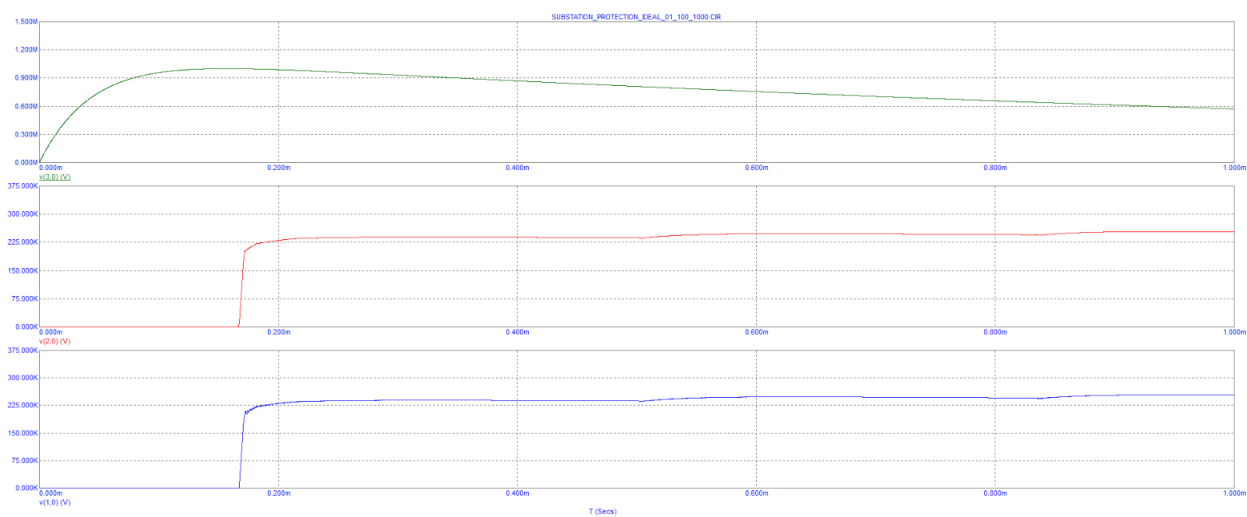


Рис. 3.2.39. Графіки напруг на схемі при відстані 60м між об'єктом та ОПН

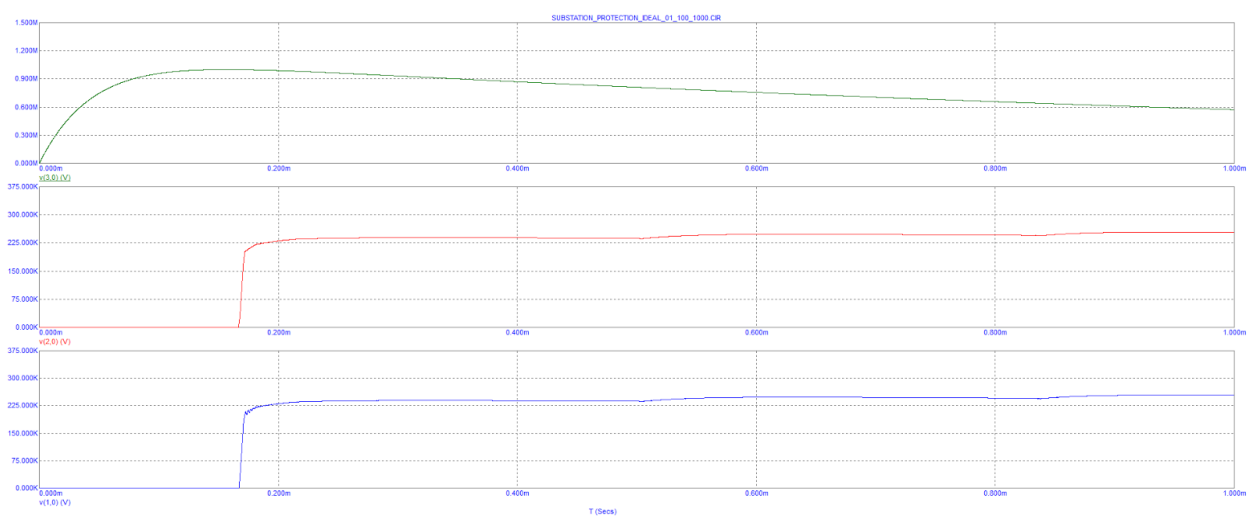


Рис. 3.2.40. Графіки напруг на схемі при відстані 70м між об'єктом та ОПН

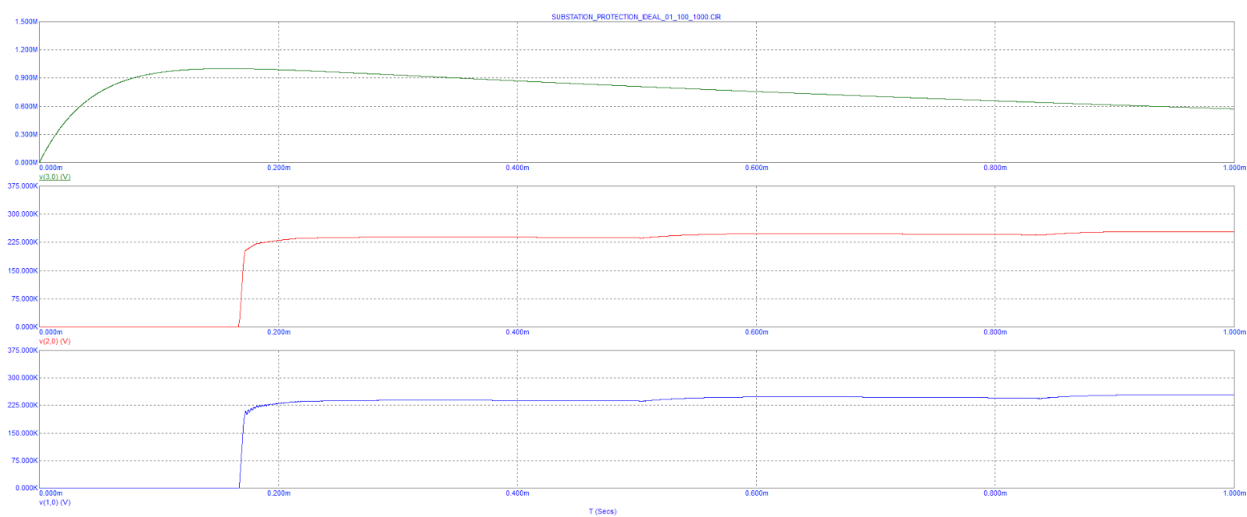


Рис. 3.2.41. Графіки напруг на схемі при відстані 80м між об'єктом та ОПН

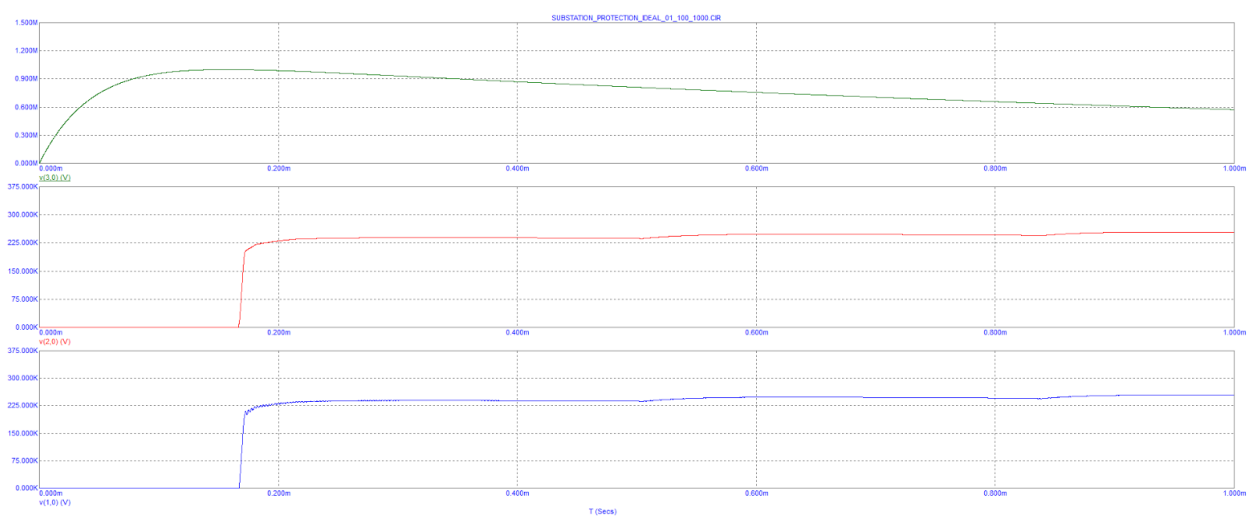


Рис. 3.2.42. Графіки напруг на схемі при відстані 90м між об'єктом та ОПН

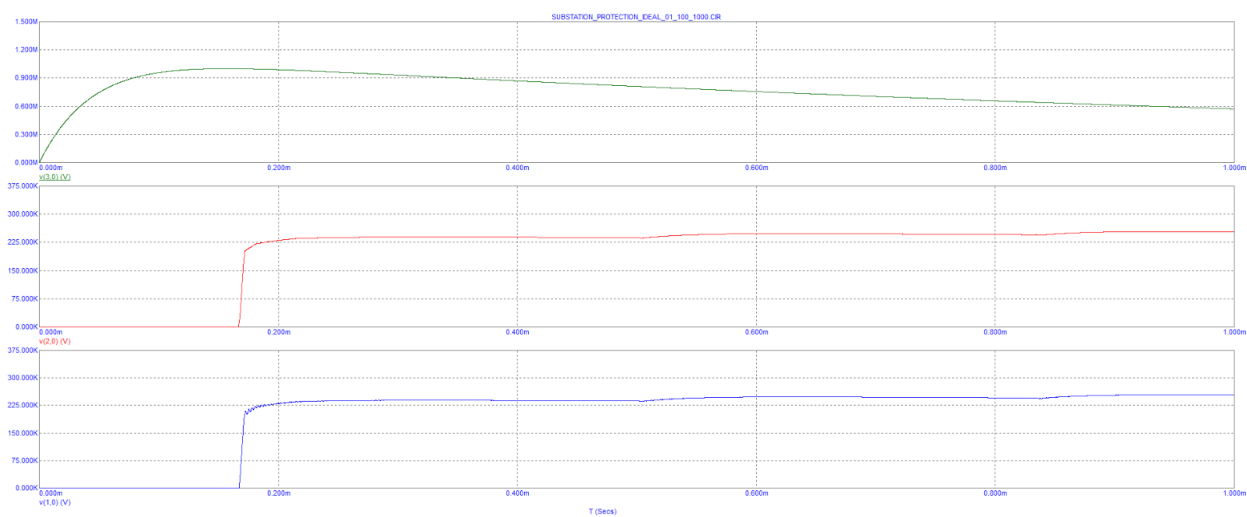


Рис. 3.2.43. Графіки напруг на схемі при відстані 100м між об'єктом та ОПН

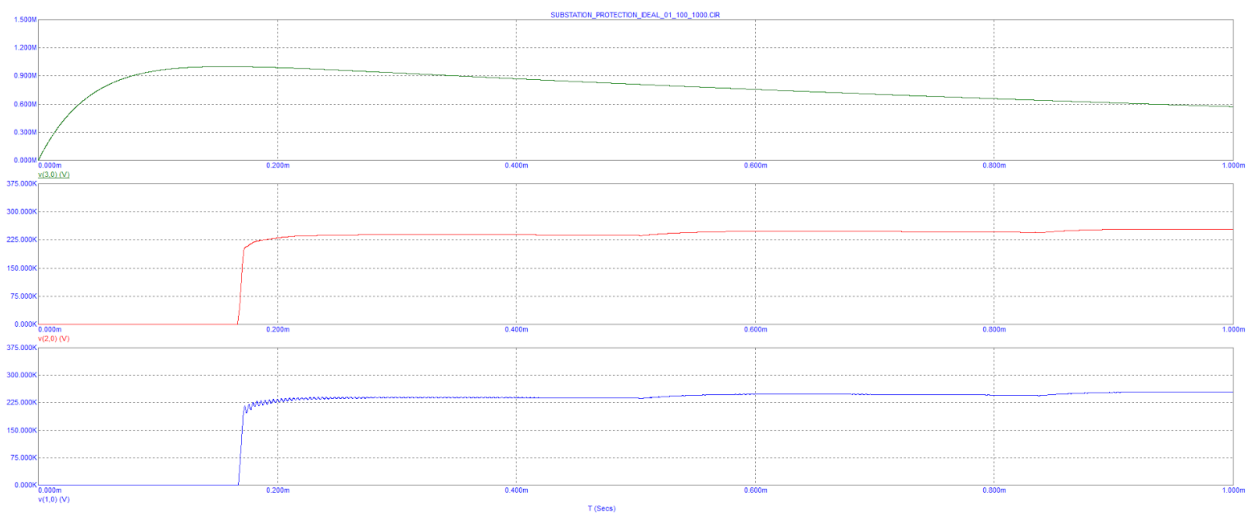


Рис. 3.2.44. Графіки напруг на схемі при відстані 150м між об'єктом та ОПН

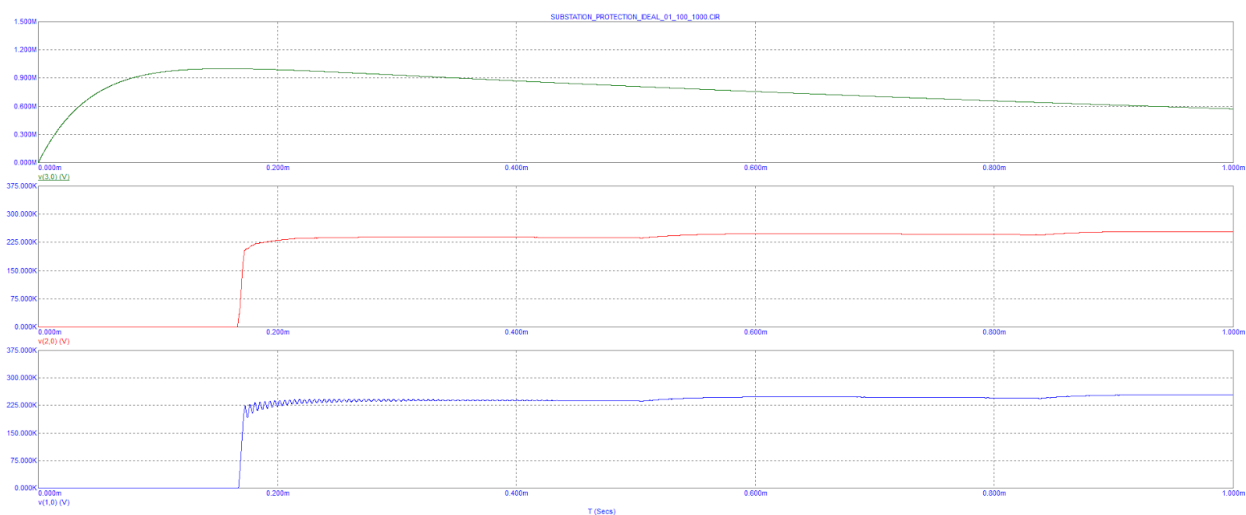


Рис. 3.2.45. Графіки напруг на схемі при відстані 200м між об'єктом та ОПН



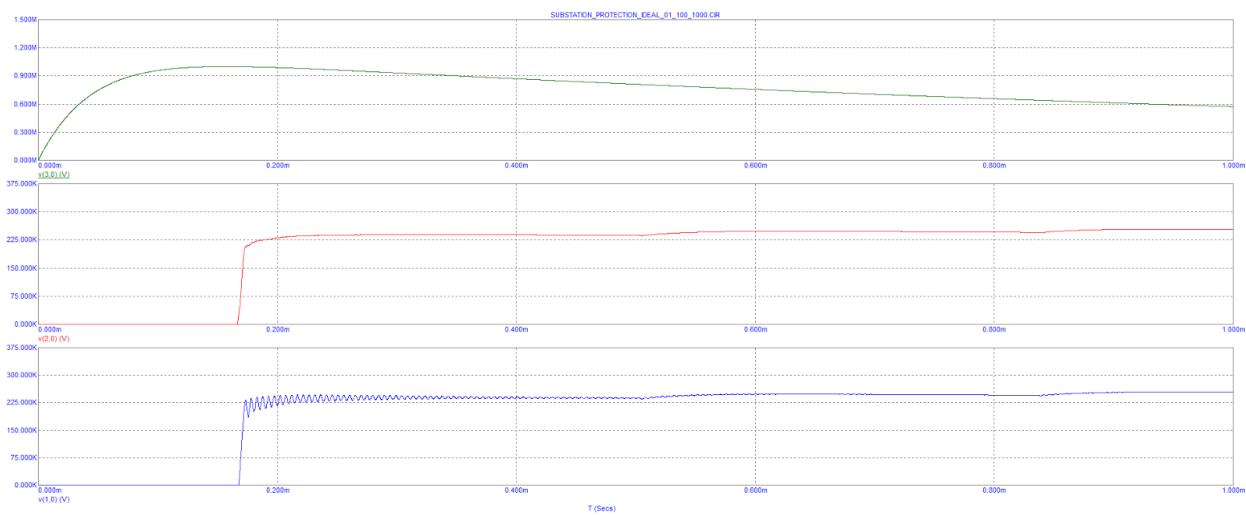


Рис. 3.2.46. Графіки напруг на схемі при відстані 250м між об'єктом та ОПН

### 3.2.3. Дослідження при дії грозового імпульсу напруги 250/2500 мкс.

Параметри схеми залишаються незмінними згідно з рис. 3.3 окрім значення імпульсу.

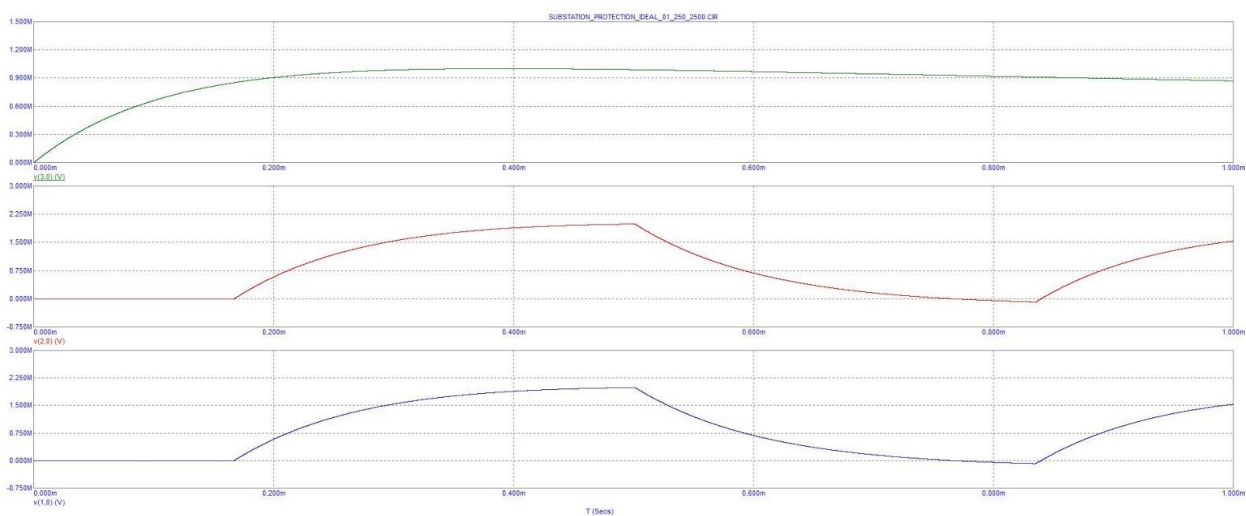


Рис. 3.2.47. Графіки напруг на схемі без ОПН

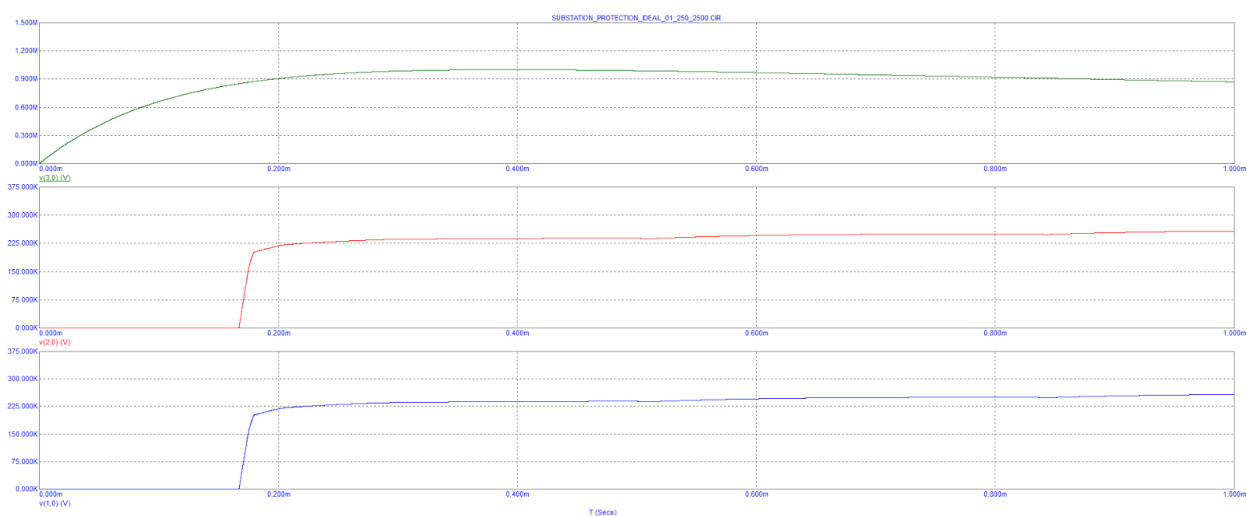


Рис. 3.2.48. Графіки напруг на схемі при відстані 1м між об'єктом та ОПН

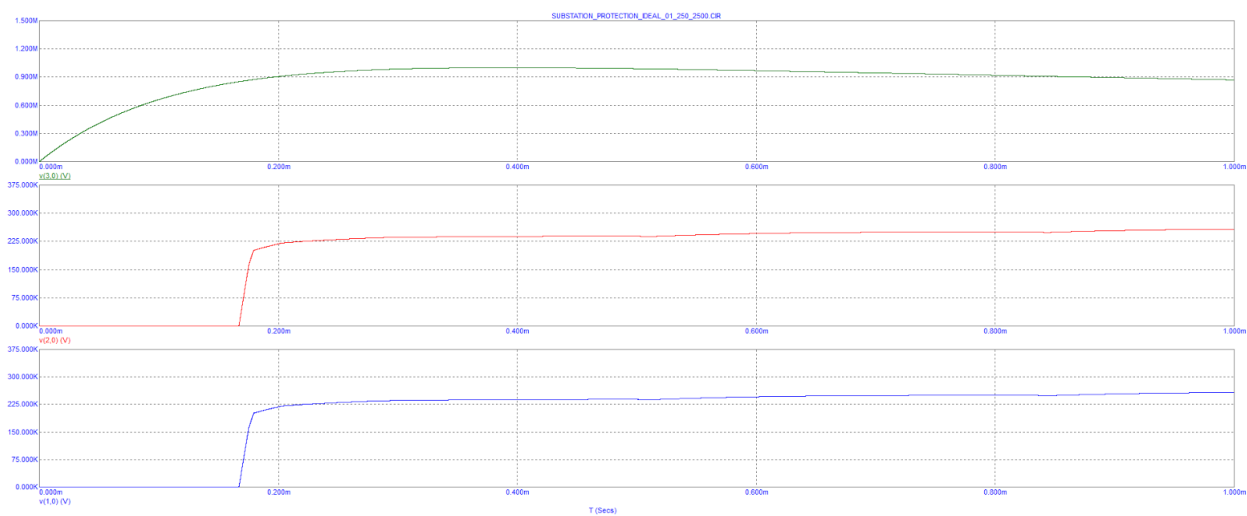


Рис. 3.2.49. Графіки напруг на схемі при відстані 2м між об'єктом та ОПН

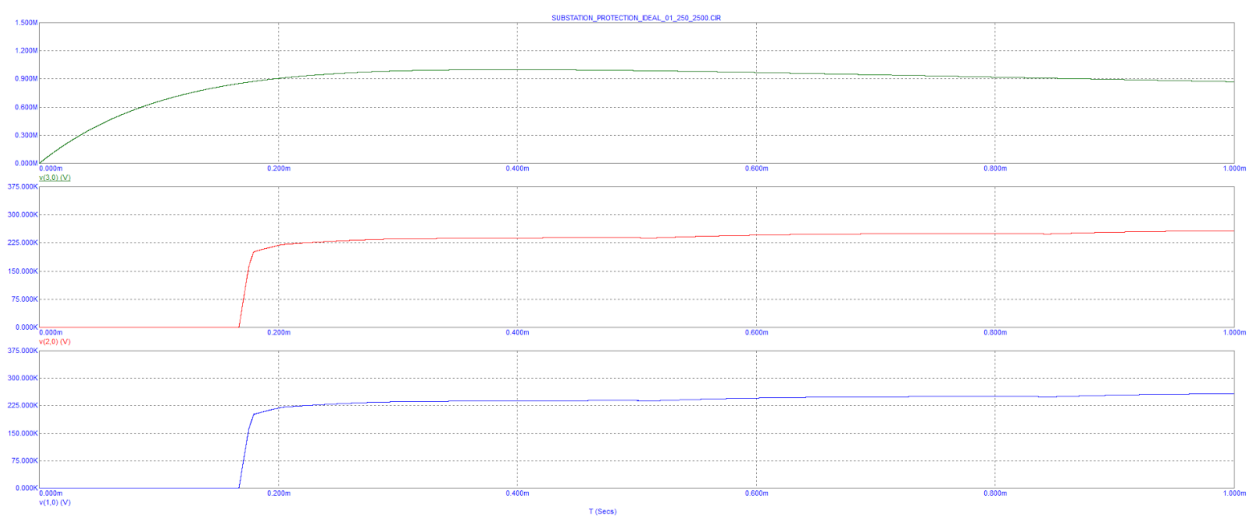


Рис. 3.2.50. Графіки напруг на схемі при відстані 3м між об'єктом та ОПН

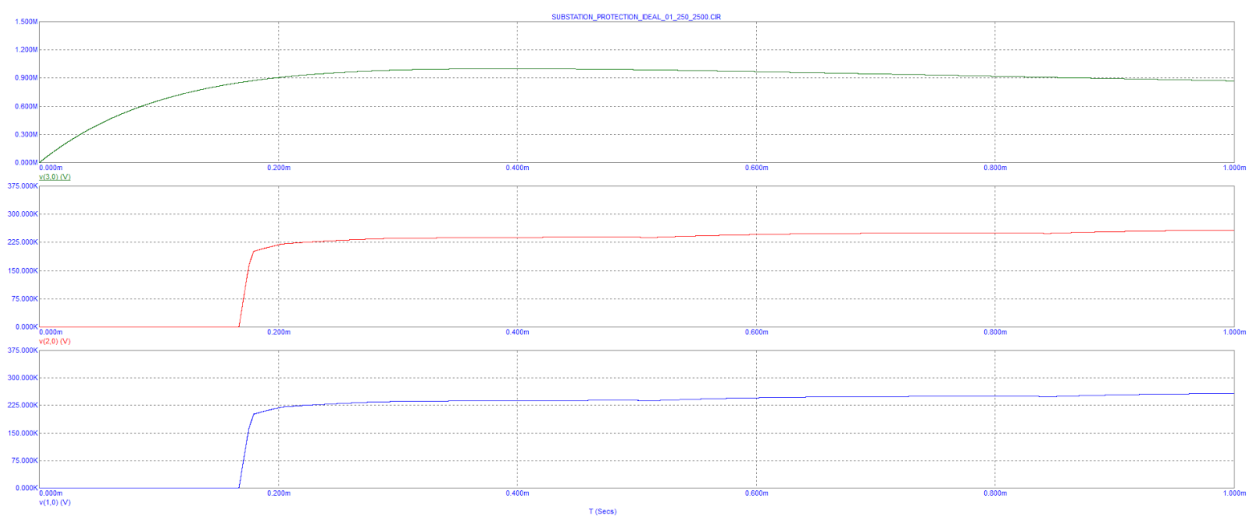


Рис. 3.2.51. Графіки напруг на схемі при відстані 4м між об'єктом та ОПН

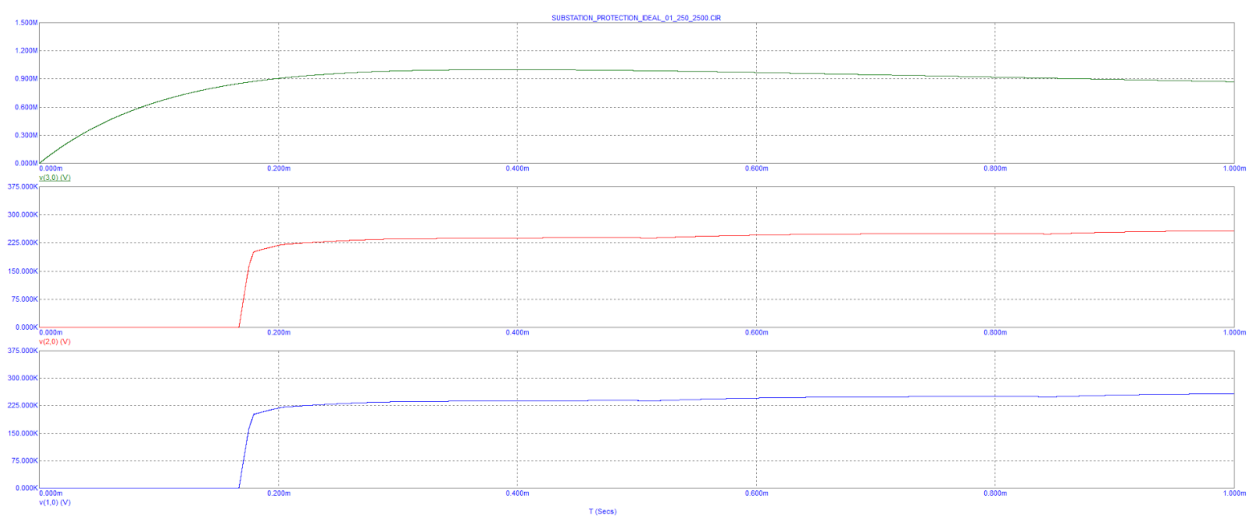


Рис. 3.2.52. Графіки напруг на схемі при відстані 5м між об'єктом та ОПН

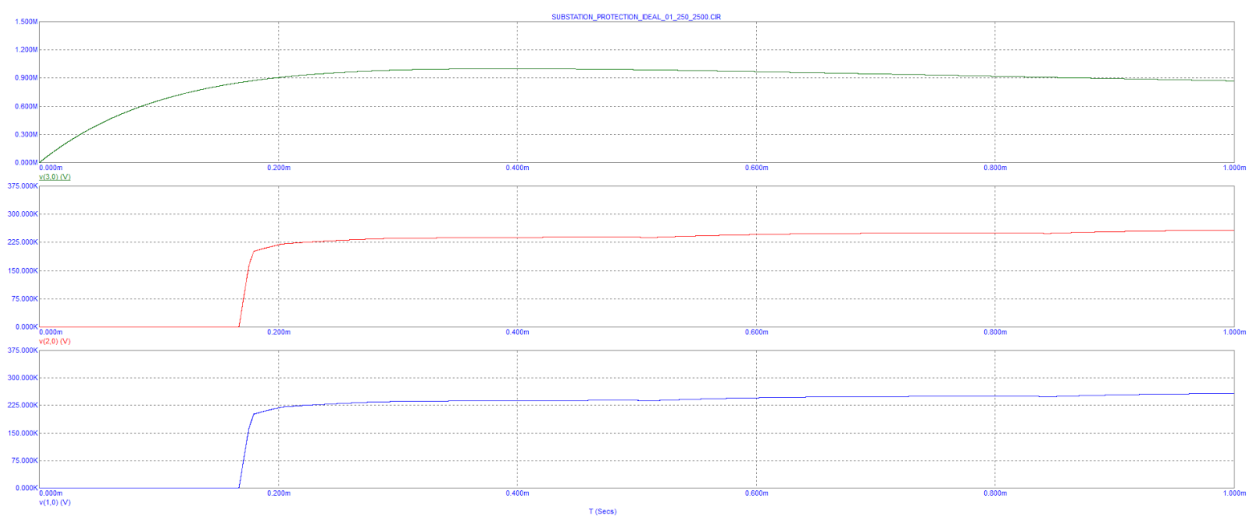


Рис. 3.2.53. Графіки напруг на схемі при відстані 10м між об'єктом та ОПН

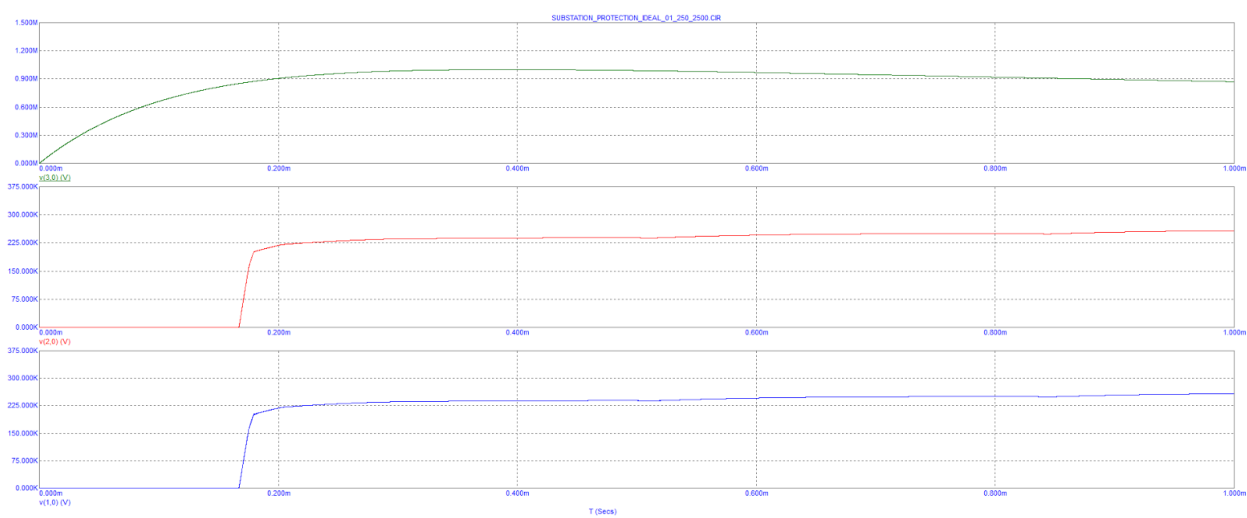


Рис. 3.2.54. Графіки напруг на схемі при відстані 15м між об'єктом та ОПН

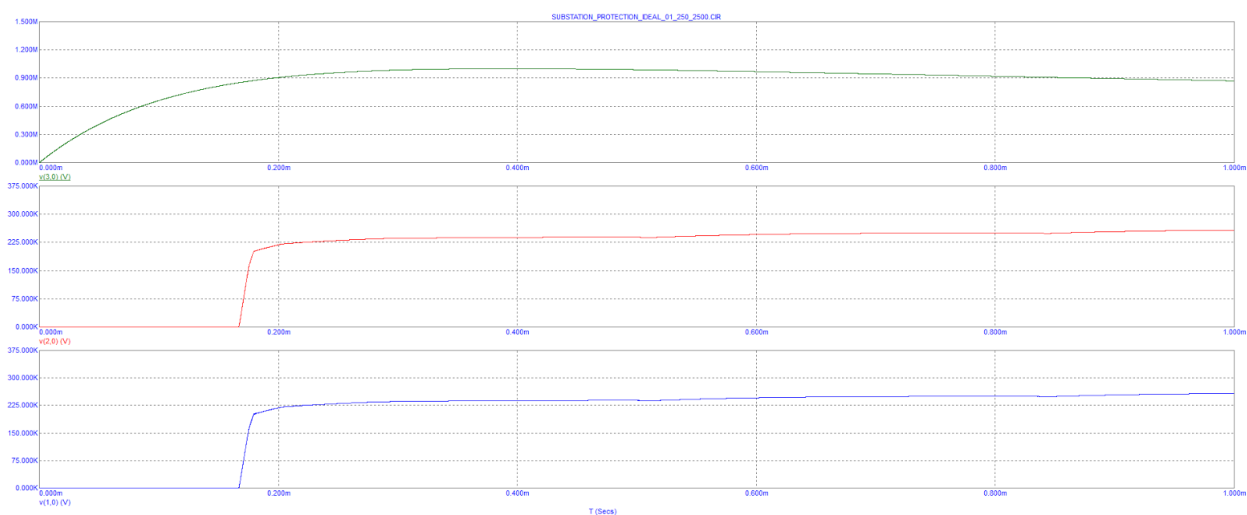


Рис. 3.2.55. Графіки напруг на схемі при відстані 20м між об'єктом та ОПН

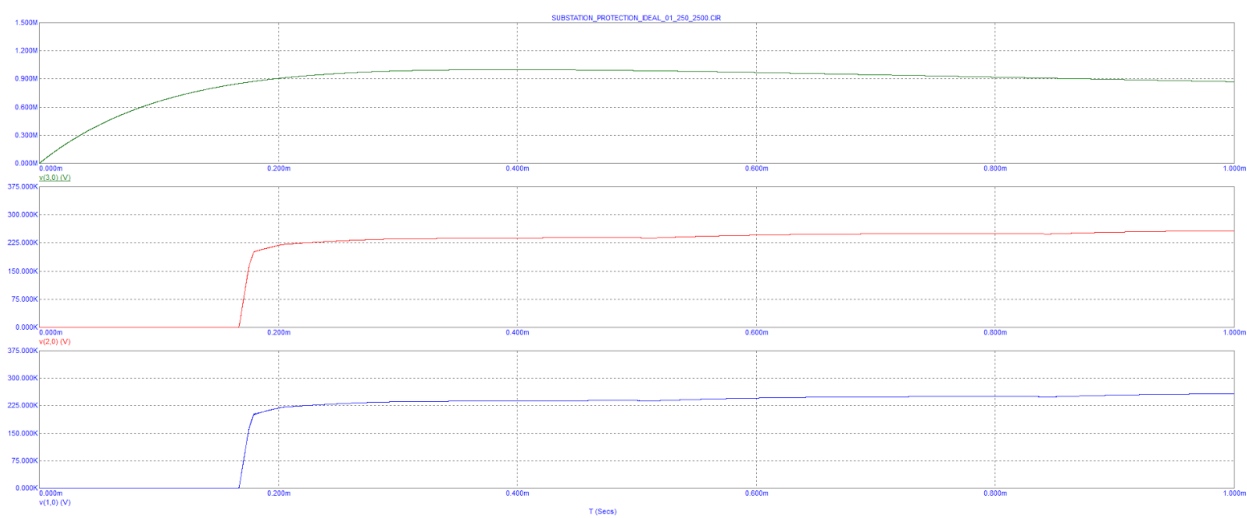


Рис. 3.2.56. Графіки напруг на схемі при відстані 25м між об'єктом та ОПН

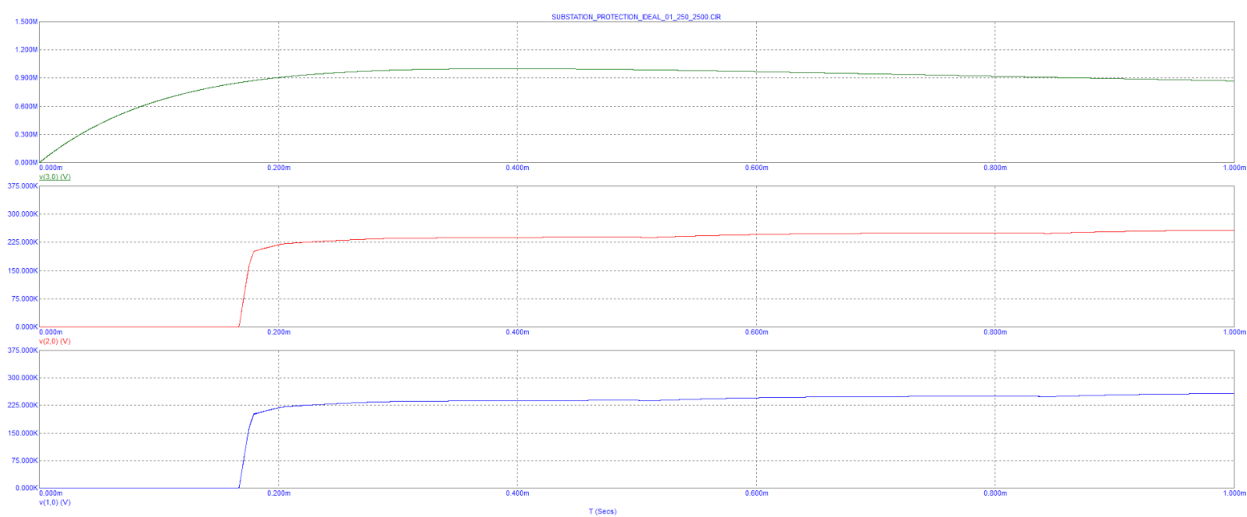


Рис. 3.2.57. Графіки напруг на схемі при відстані 30м між об'єктом та ОПН

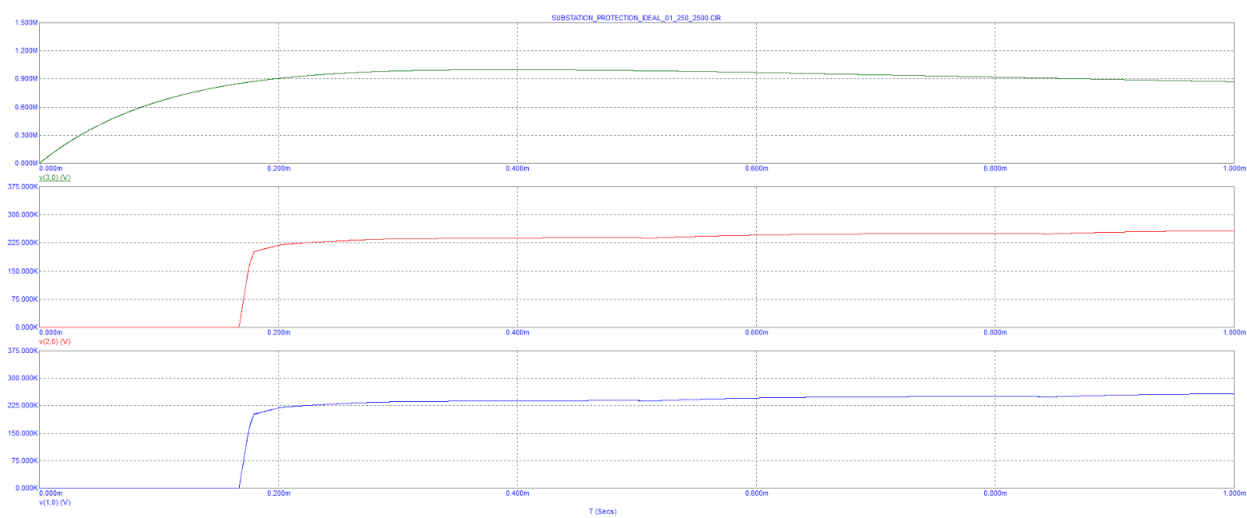


Рис. 3.2.58. Графіки напруг на схемі при відстані 35м між об'єктом та ОПН

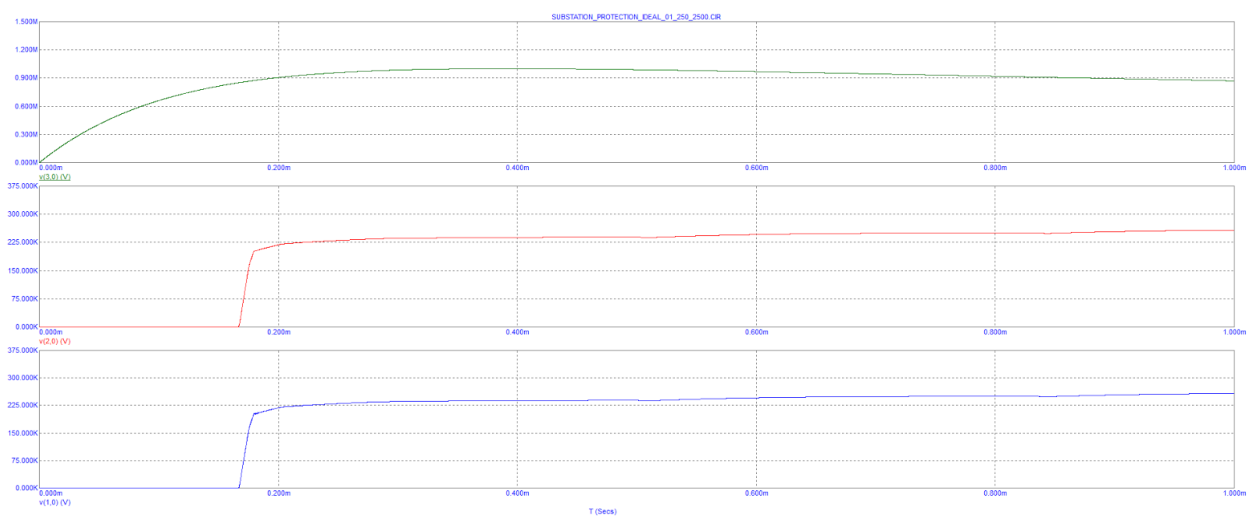


Рис. 3.2.59. Графіки напруг на схемі при відстані 40м між об'єктом та ОПН

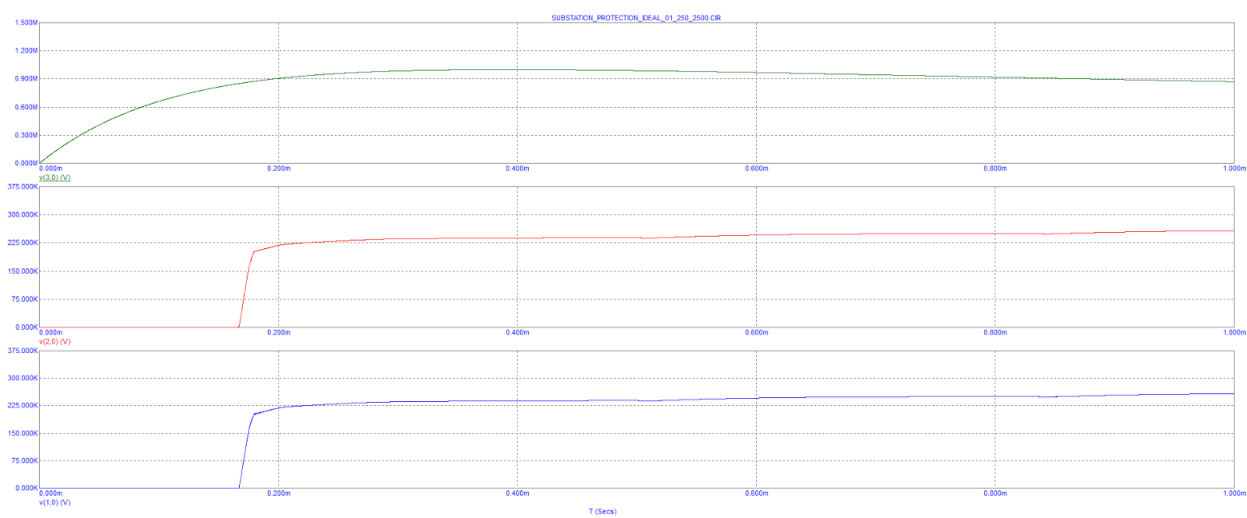


Рис. 3.2.60. Графіки напруг на схемі при відстані 45м між об'єктом та ОПН

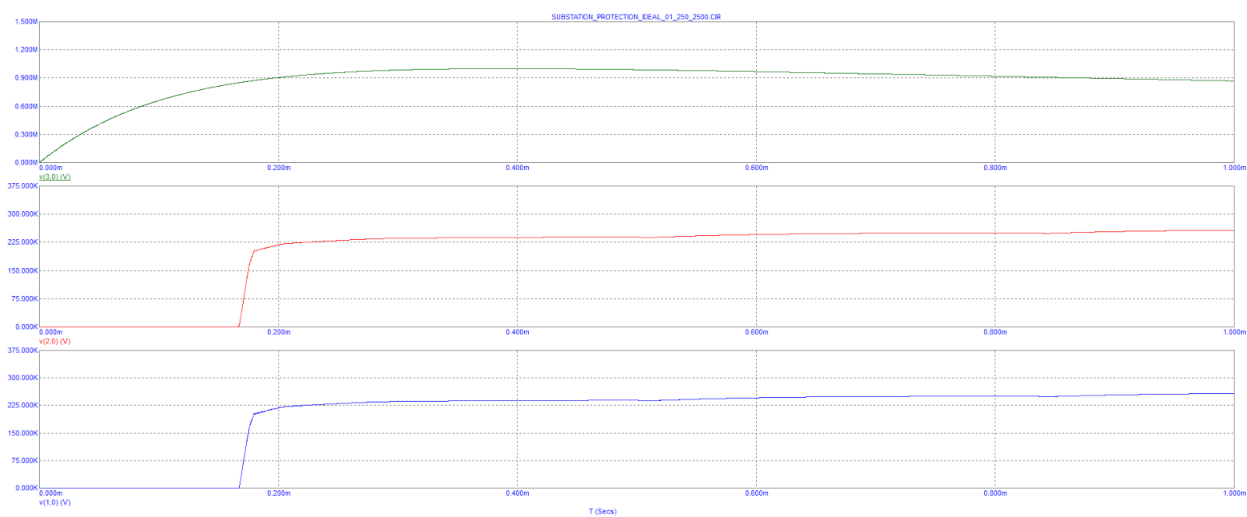


Рис. 3.2.61. Графіки напруг на схемі при відстані 50м між об'єктом та ОПН



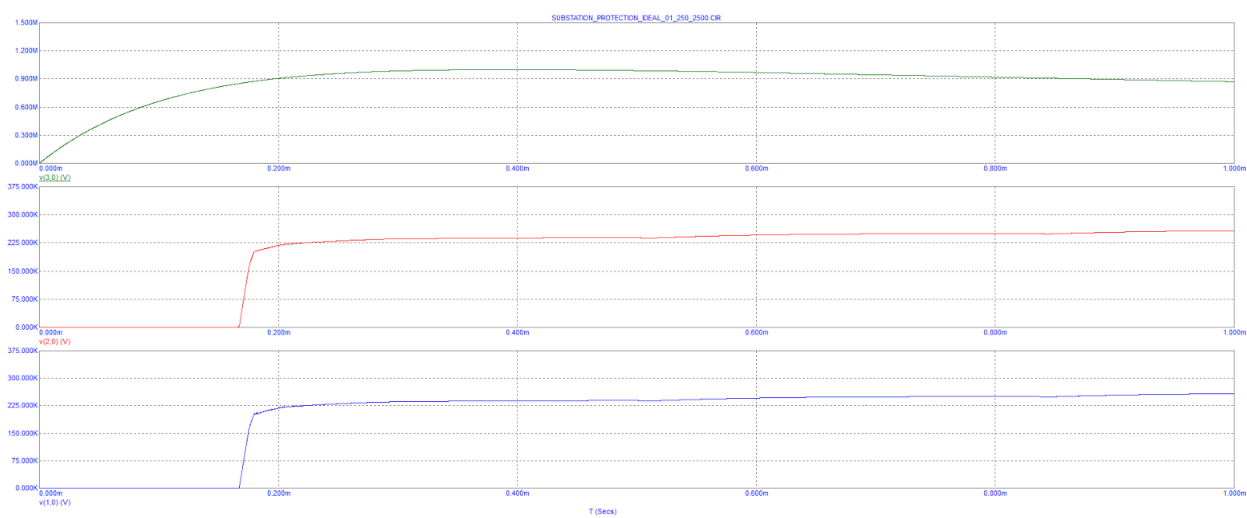


Рис. 3.2.62. Графіки напруг на схемі при відстані 60м між об'єктом та ОПН

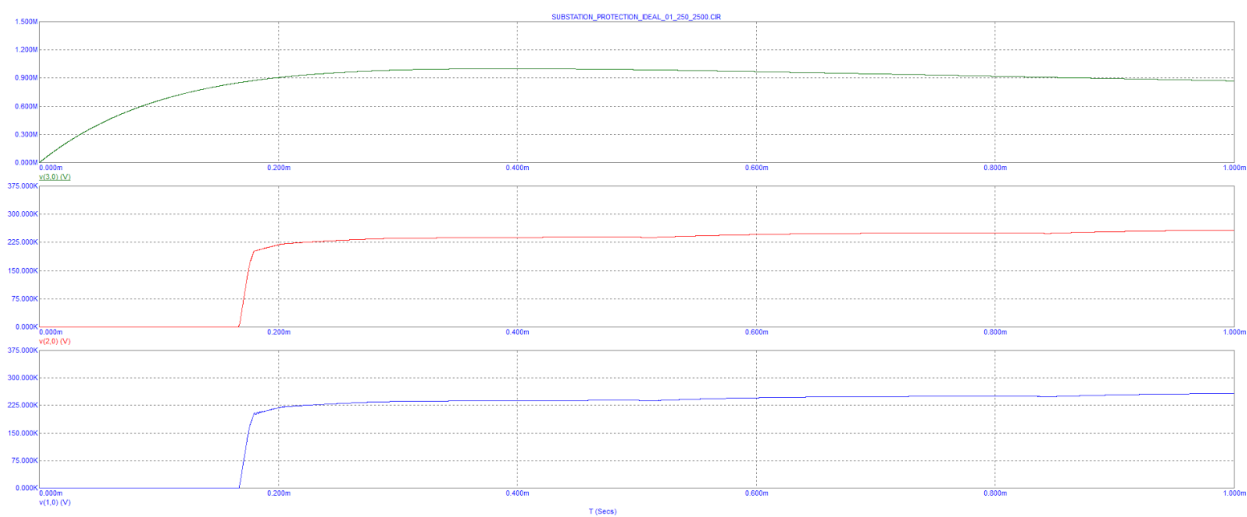


Рис. 3.2.63. Графіки напруг на схемі при відстані 70м між об'єктом та ОПН

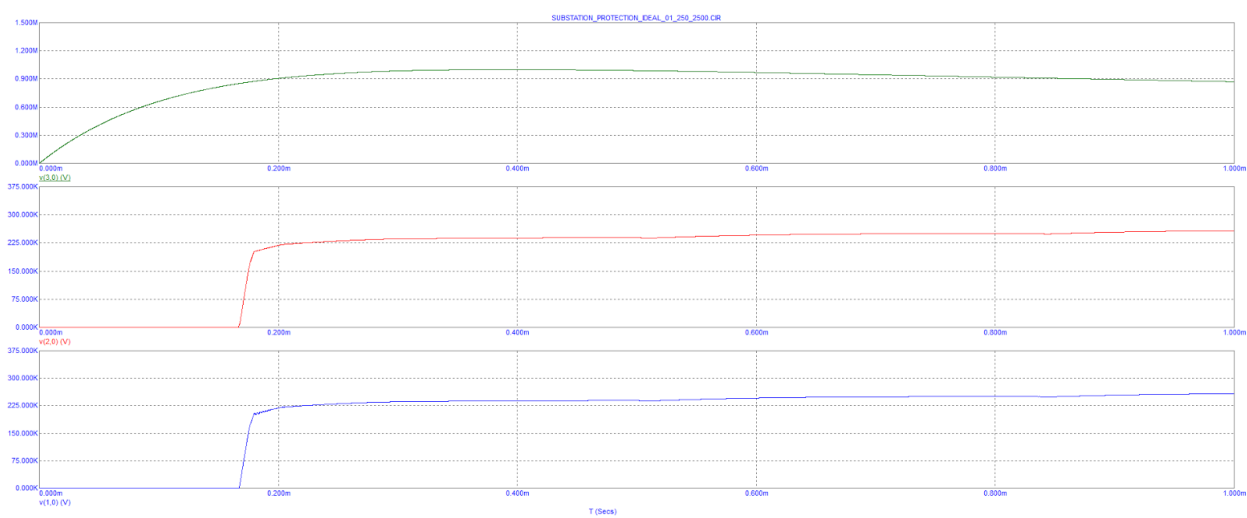


Рис. 3.2.64. Графіки напруг на схемі при відстані 80м між об'єктом та ОПН

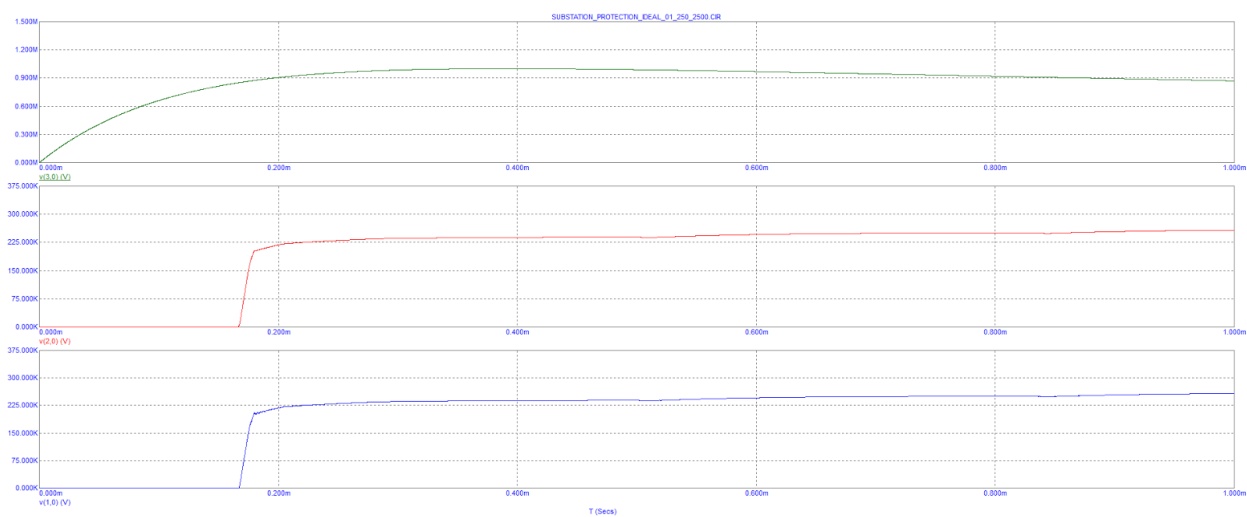


Рис. 3.2.65. Графіки напруг на схемі при відстані 90м між об'єктом та ОПН

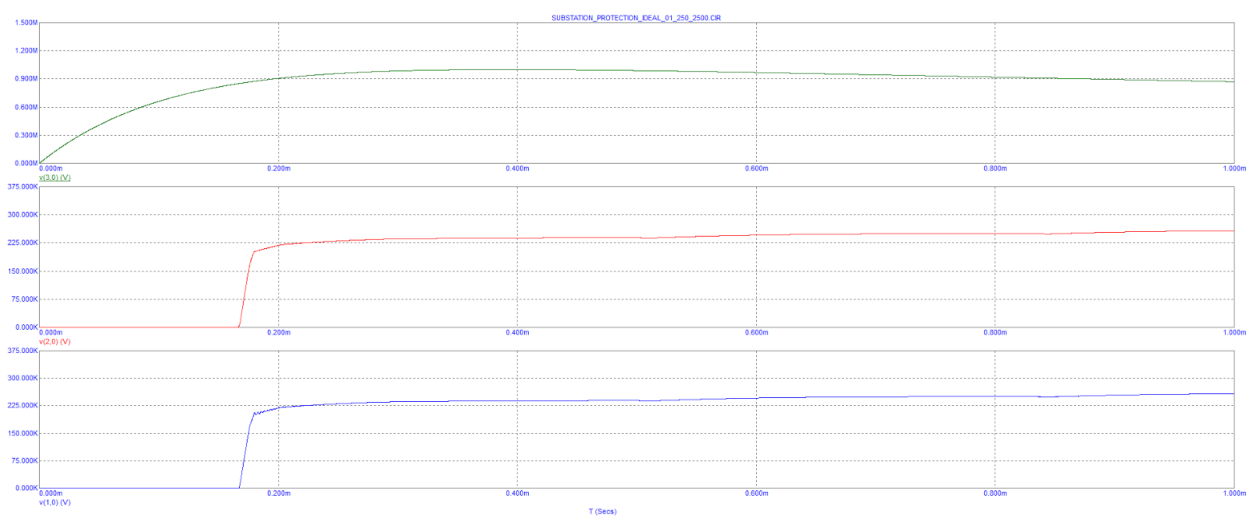


Рис. 3.2.66. Графіки напруг на схемі при відстані 100м між об'єктом та ОПН

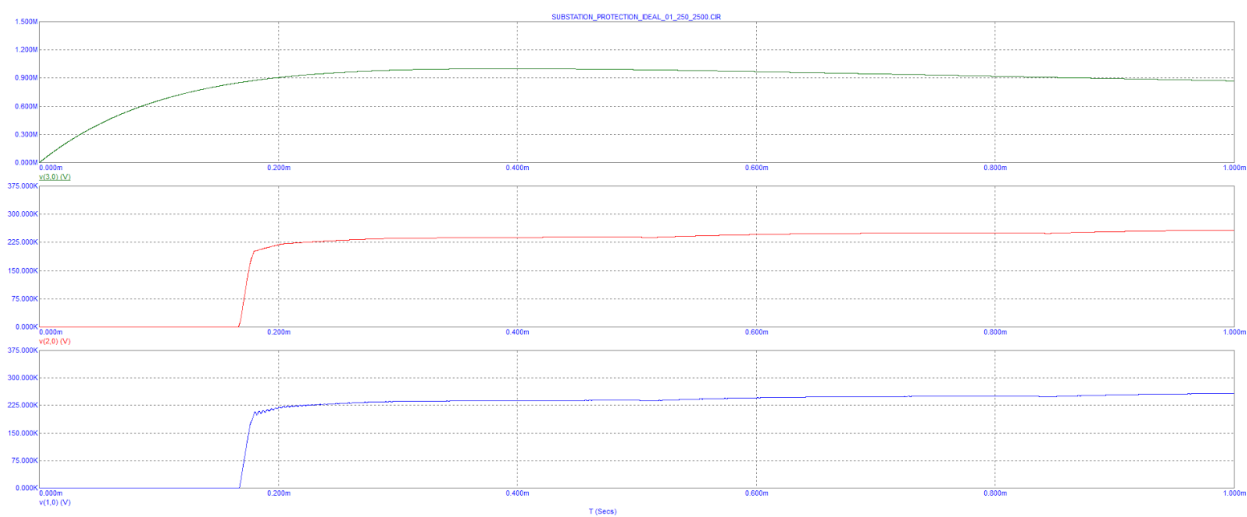


Рис. 3.2.67. Графіки напруг на схемі при відстані 150м між об'єктом та ОПН

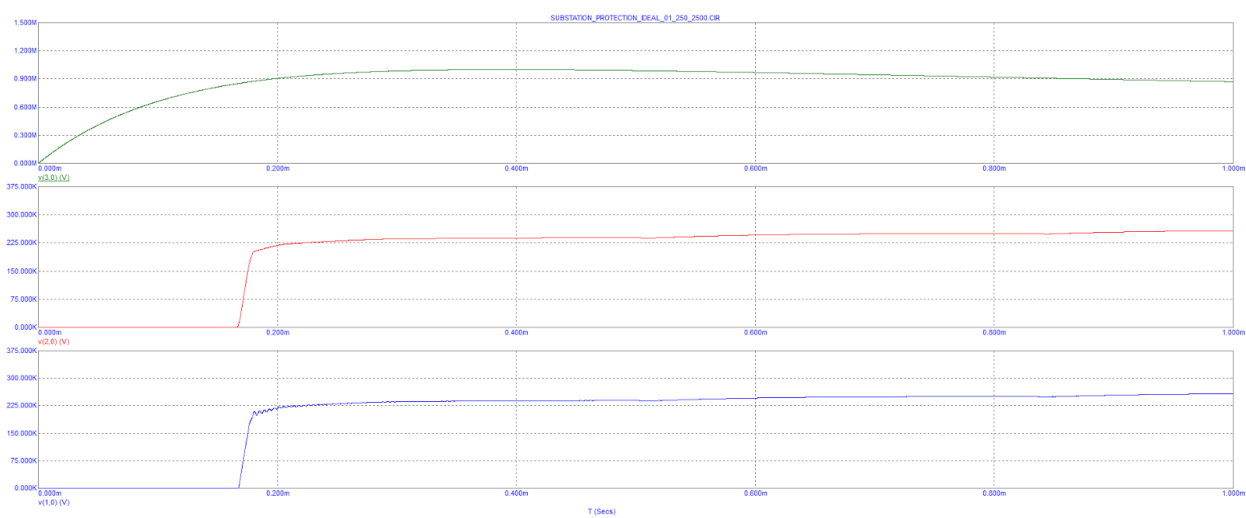


Рис. 3.2.68. Графіки напруг на схемі при відстані 200м між об'єктом та ОПН

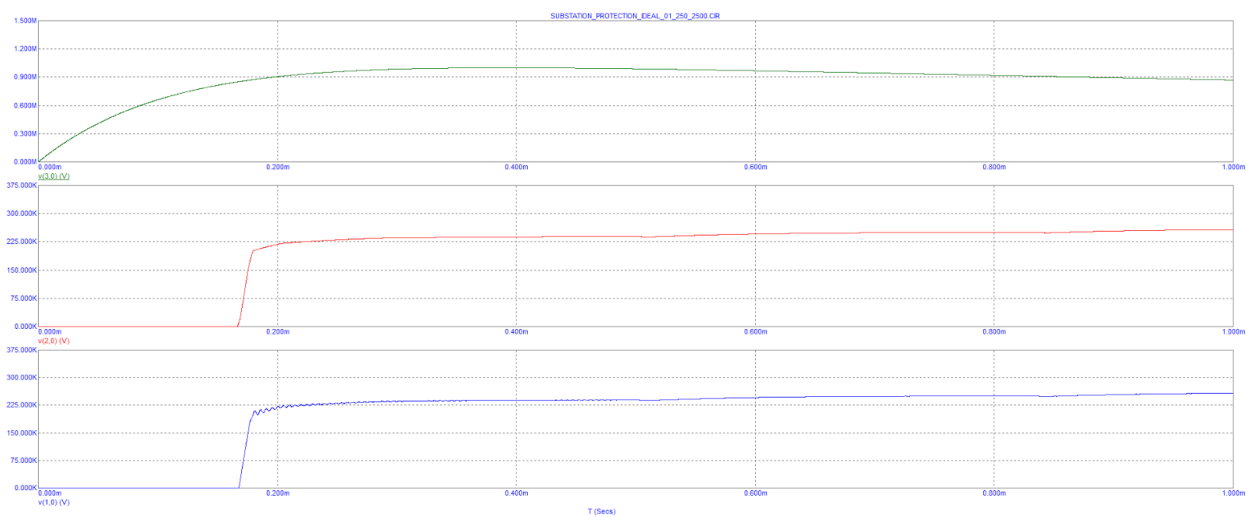


Рис. 3.2.69. Графіки напруг на схемі при відстані 250м між об'єктом та ОПН

### 3.2. Дослідження спрощеної схеми захисту трансформаторної підстанції

Змодельуємо систему захисту спрощеної схеми трансформаторної підстанції в програмі Micro-Cap 11 Evaluation Version, ОПН відповідний рис.

3.1.

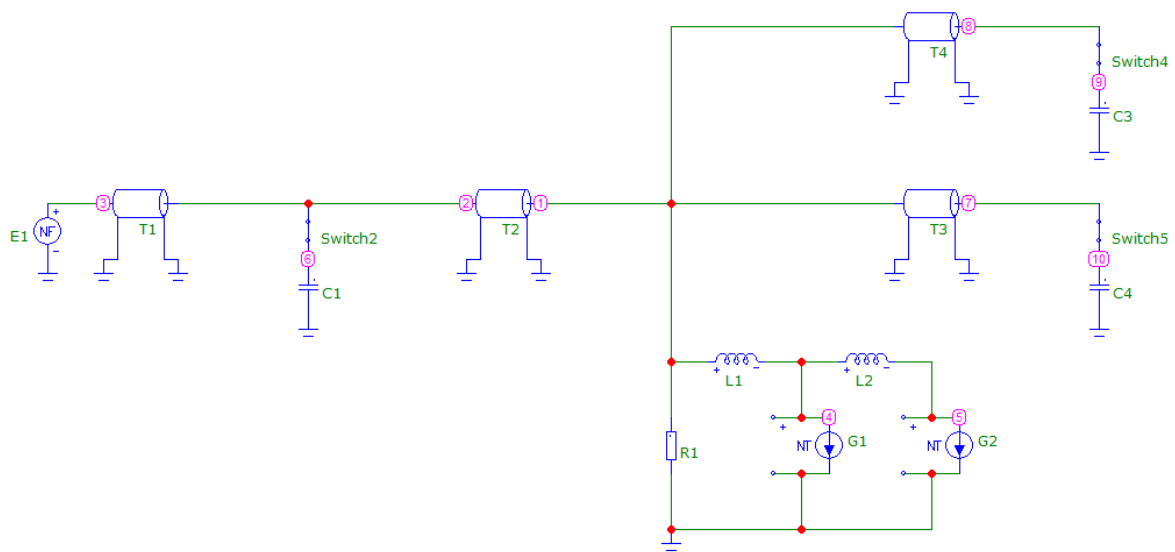


Рис. 3.3.1. Моделювання в Micro-Cap 11 Evaluation Version спрощеної схеми трансформаторної підстанції [9].

В дослідженні використовуємо типові ємності, що зазначені в таблиці 3.3.1 [9]

Таблиця 3.3.1

	Силовий трансформатор	Ємнісний трансформатор напруги	Розподільчий трансформатор
Значення ємності (пф)	3000	5000	500

Всі графіки, які будуть наведені нижче, є результатом роботи змодельованої схеми (рис. 3.3.1).

### 3.3.1 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії грозового імпульсу напруги 1.2/50 мкс.

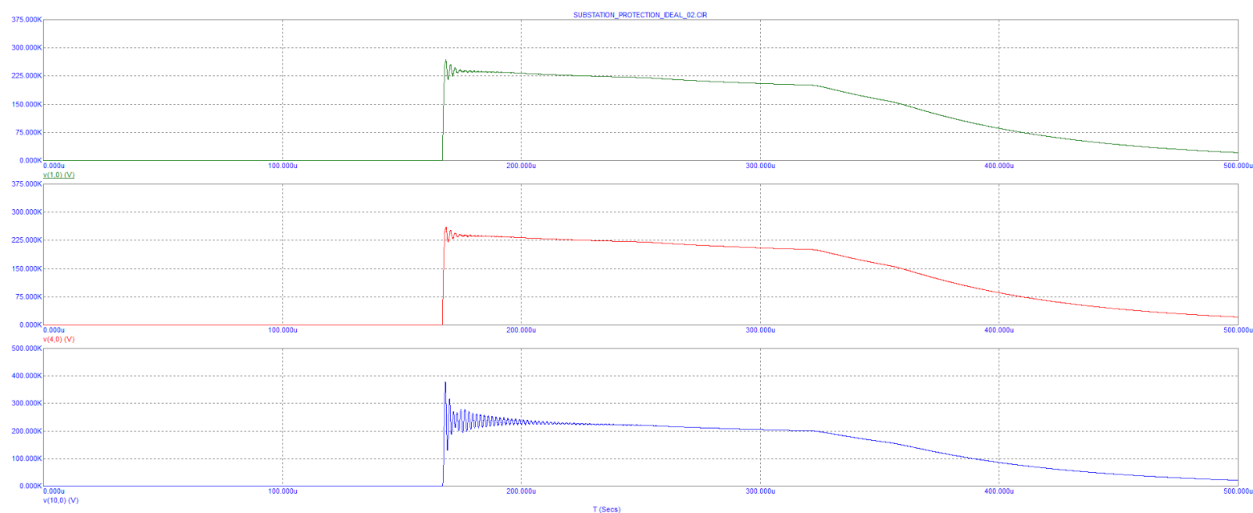


Рис. 3.3.2. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

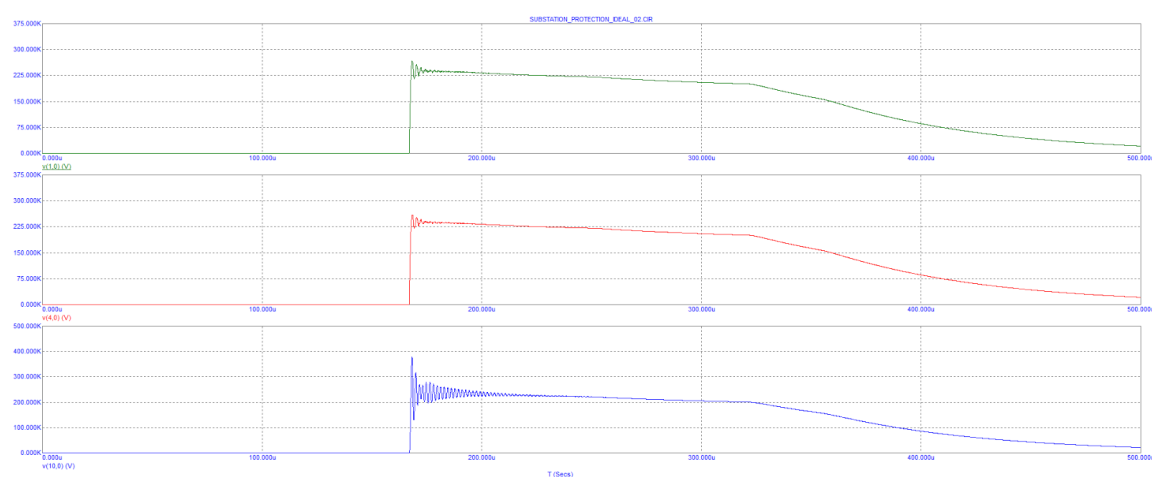


Рис. 3.3.3. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 15\text{м}$ ;

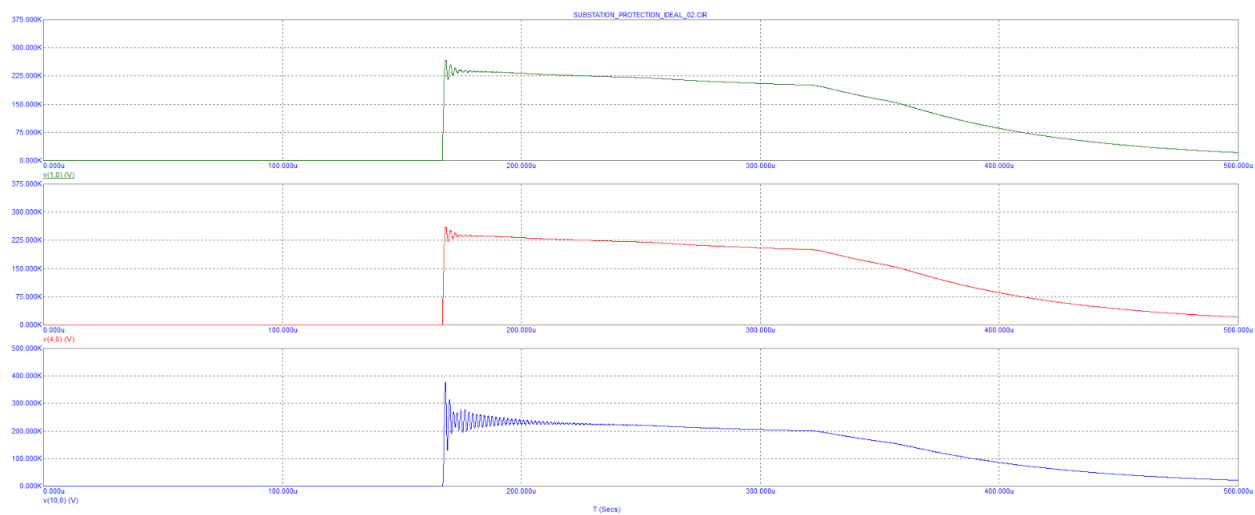


Рис. 3.3.4. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 20\text{м}$ ;

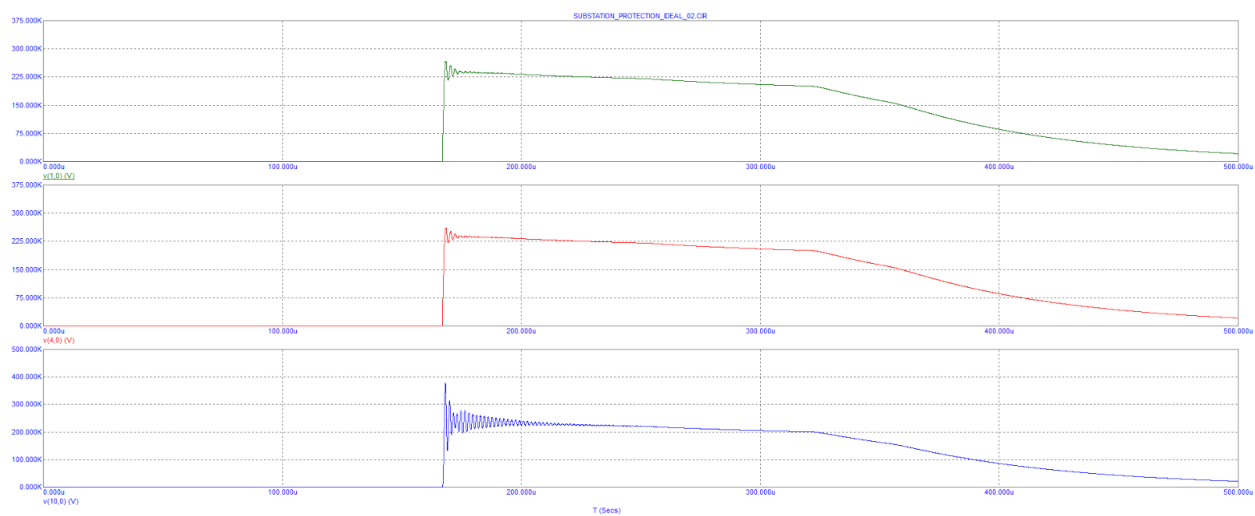


Рис. 3.3.5. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 25\text{м}$ ;

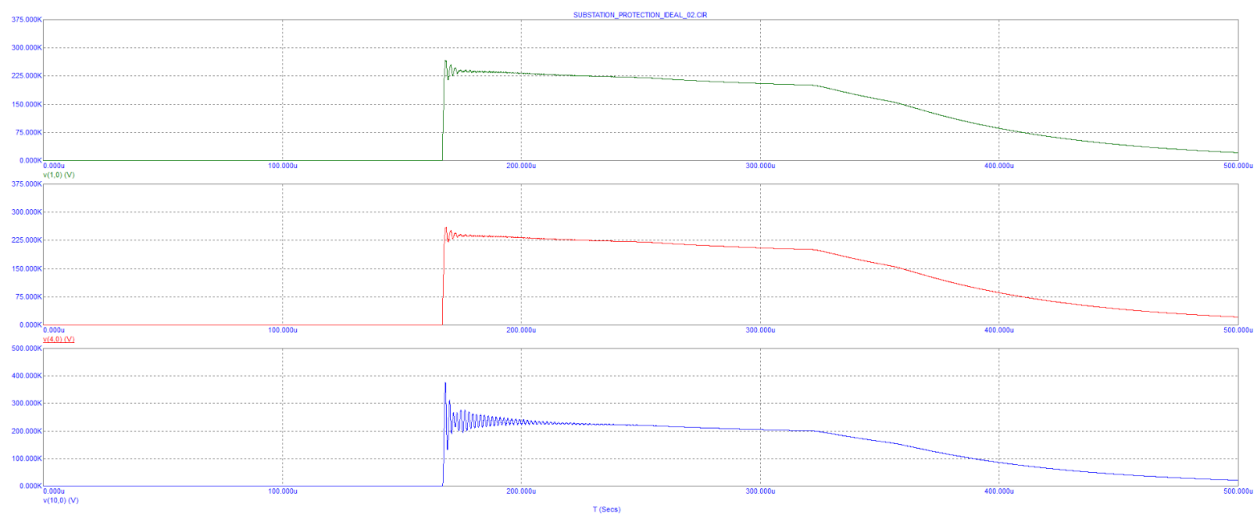


Рис. 3.3.6. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 30\text{м}$ ;

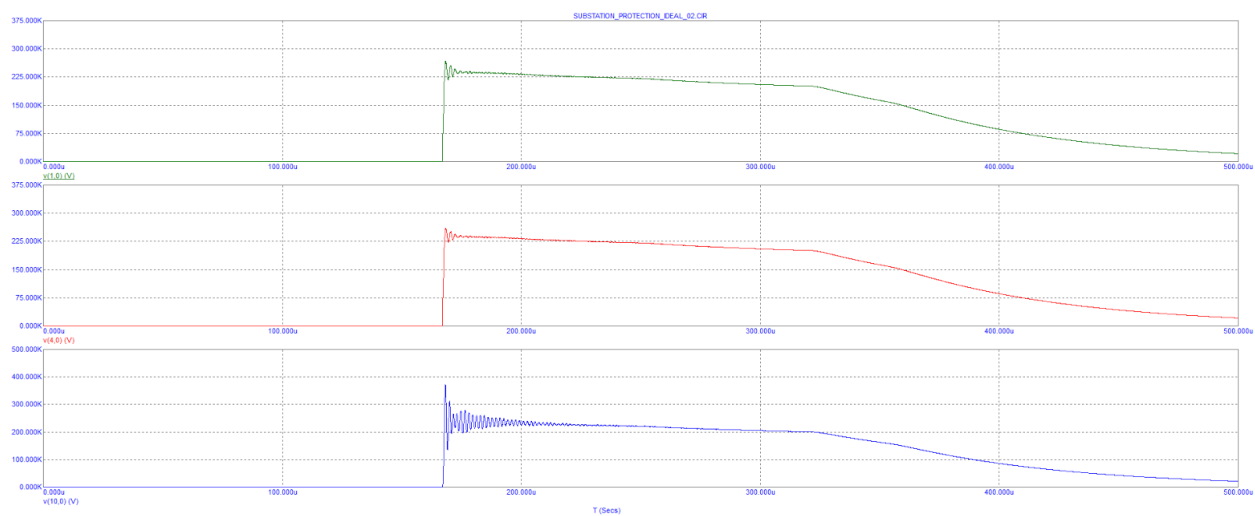


Рис. 3.3.7. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 50\text{м}$ ;



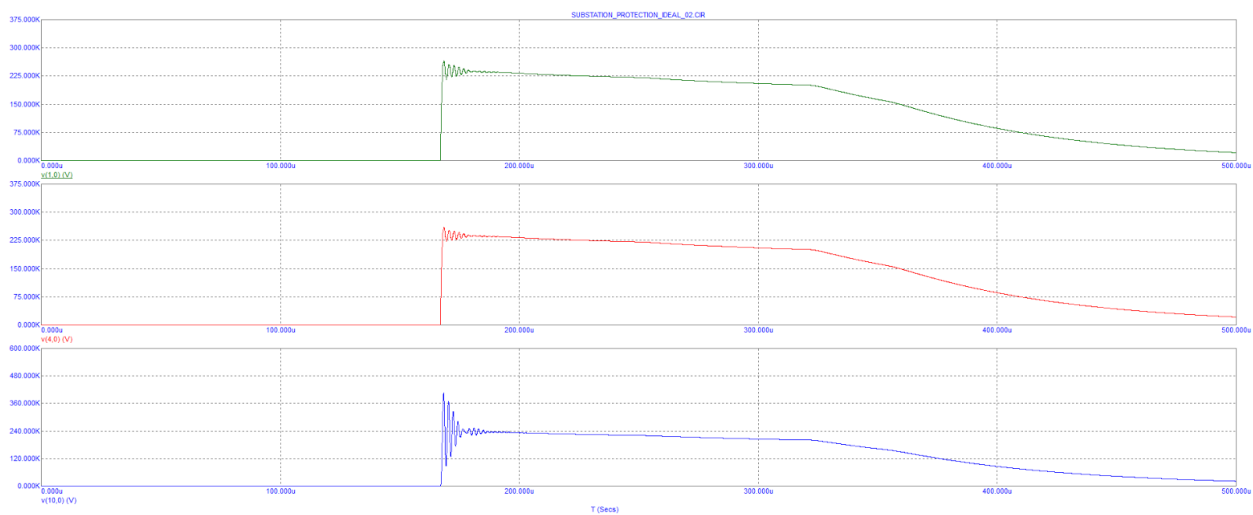


Рис. 3.3.8. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 20\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

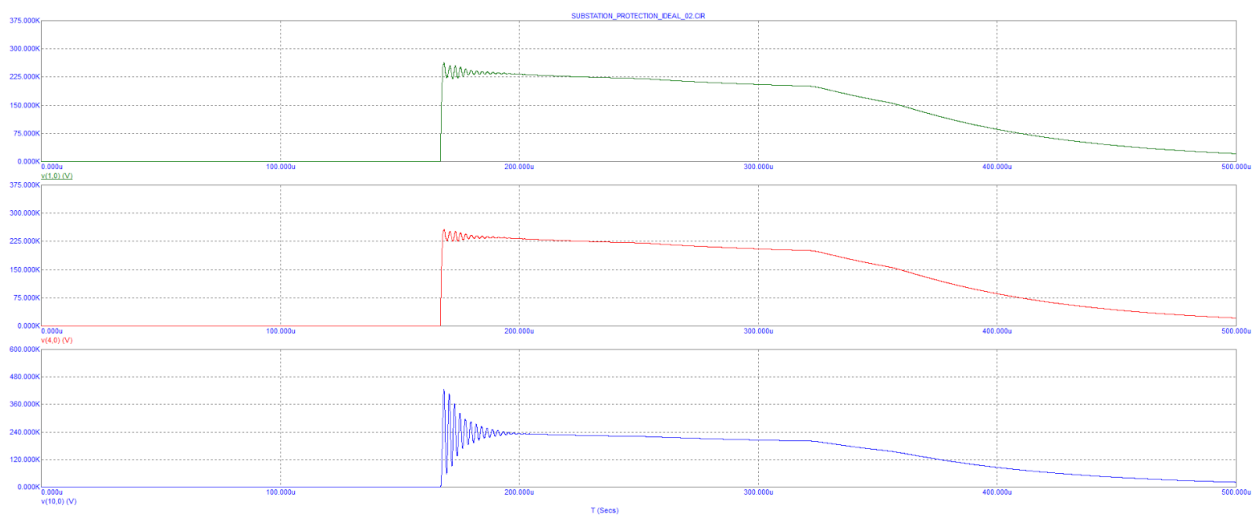


Рис. 3.3.9. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 25\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

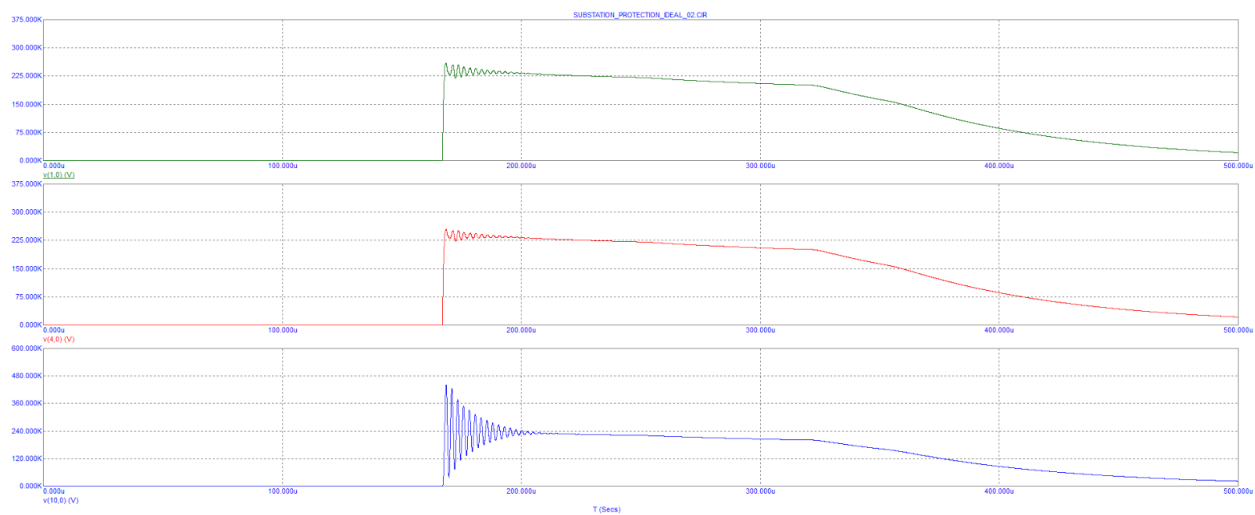


Рис. 3.3.10. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 30\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

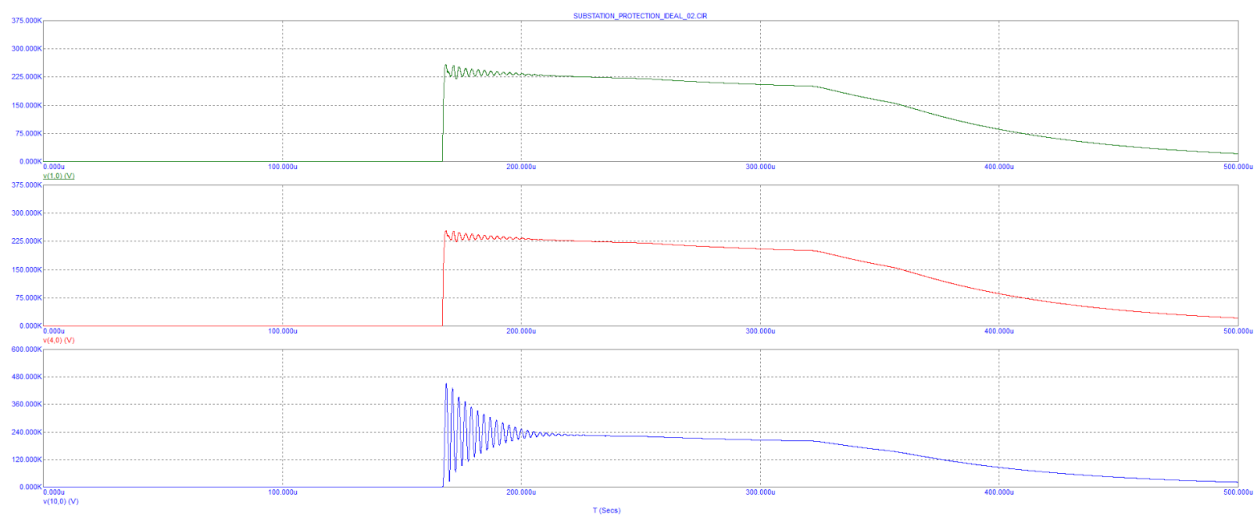


Рис. 3.3.11. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 35\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

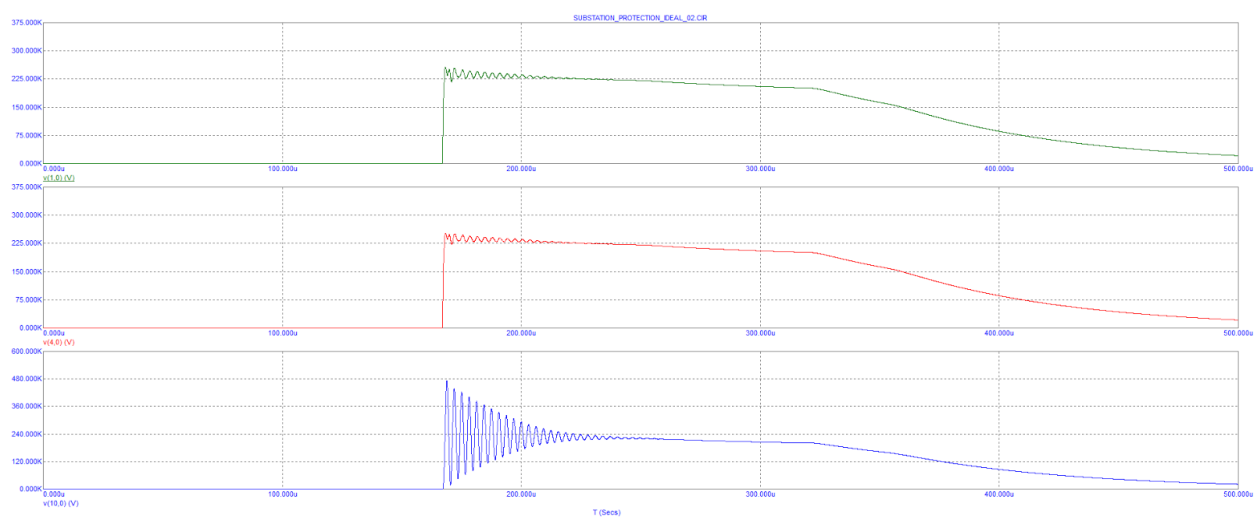


Рис. 3.3.12. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 50\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

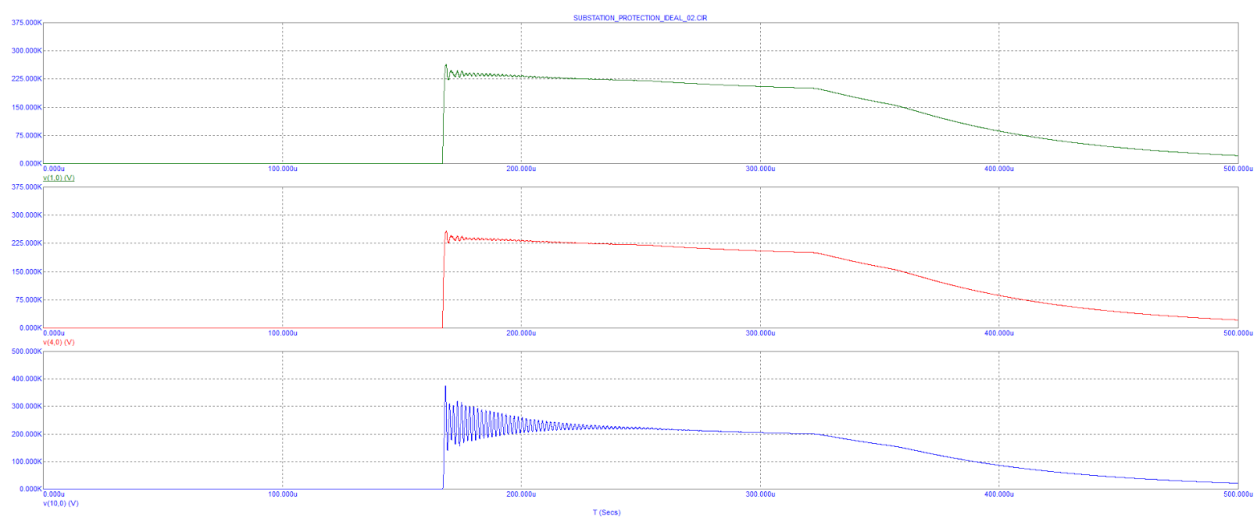


Рис. 3.3.13. Графіки напруг на схемі  $T_2 = 40\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

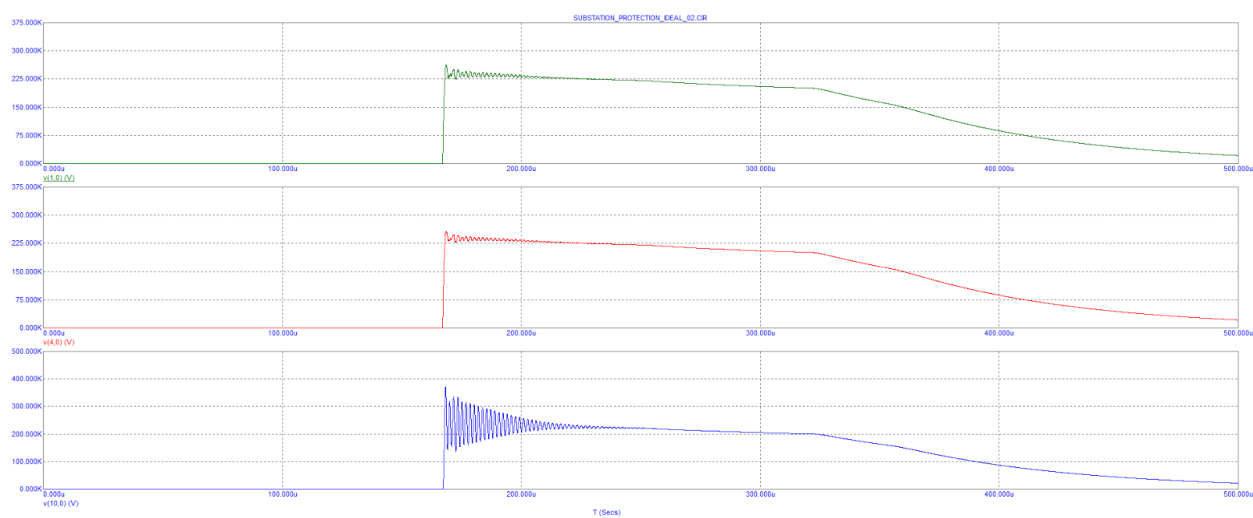


Рис. 3.3.14. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 50\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

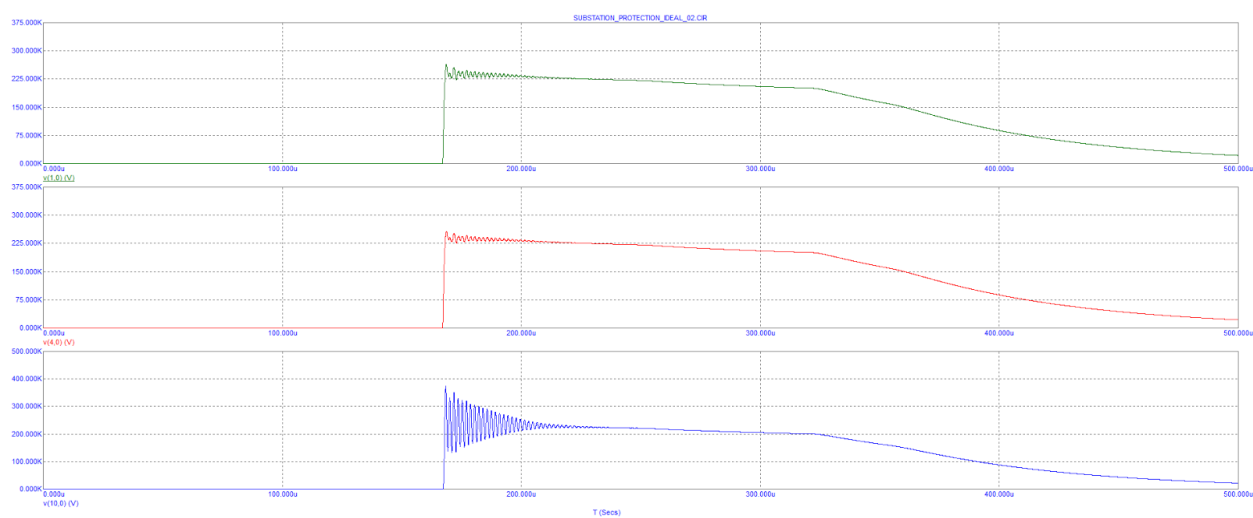


Рис. 3.3.15. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 60\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

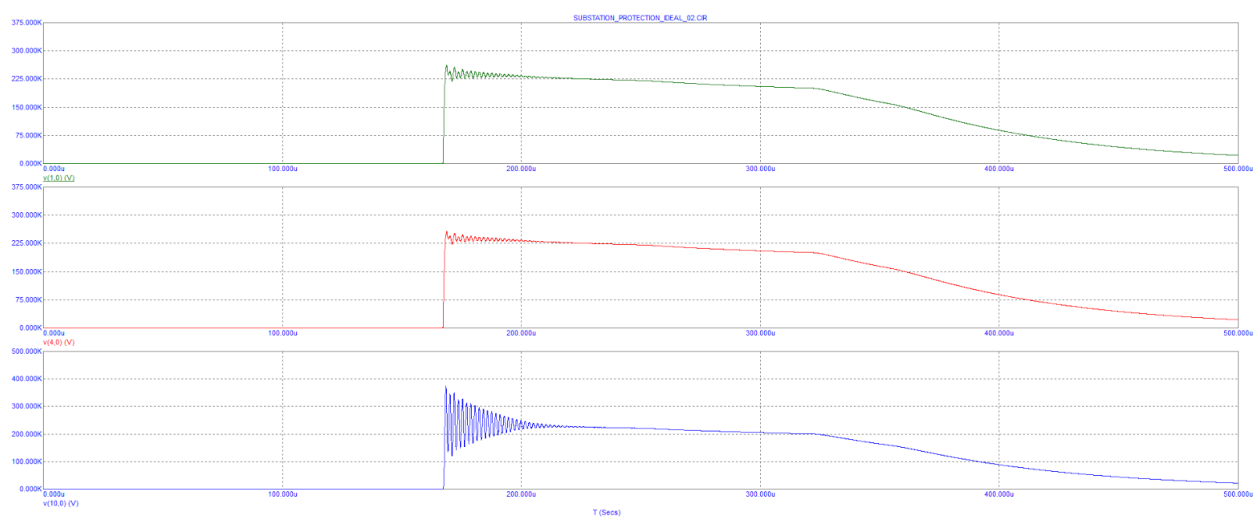


Рис. 3.3.16. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 70\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

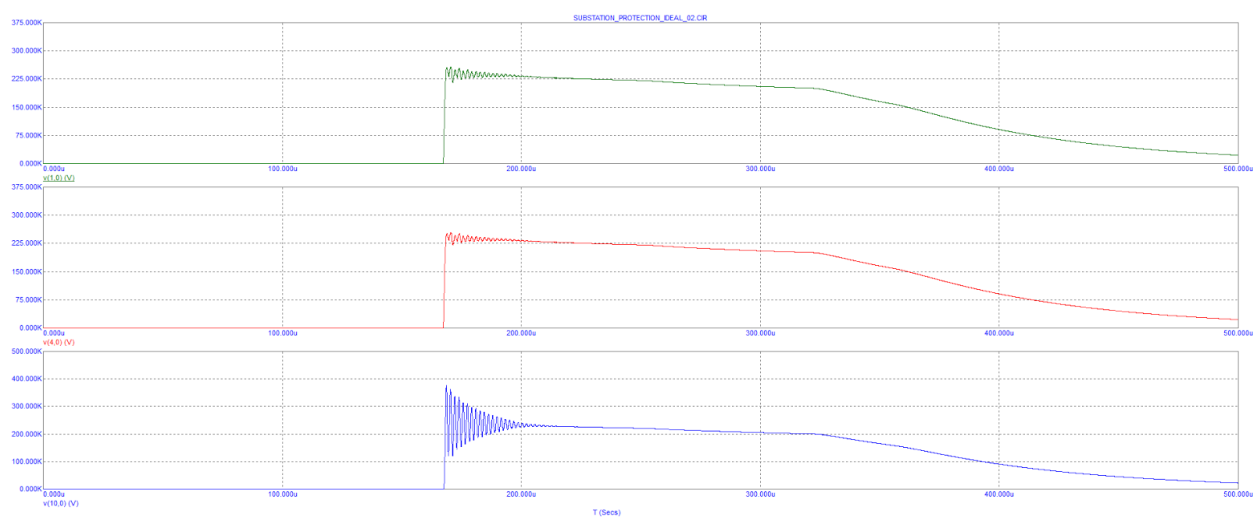


Рис. 3.3.17. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 100\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

### 3.3.2 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії комутаційного імпульсу напруги 100/1000 мкс.

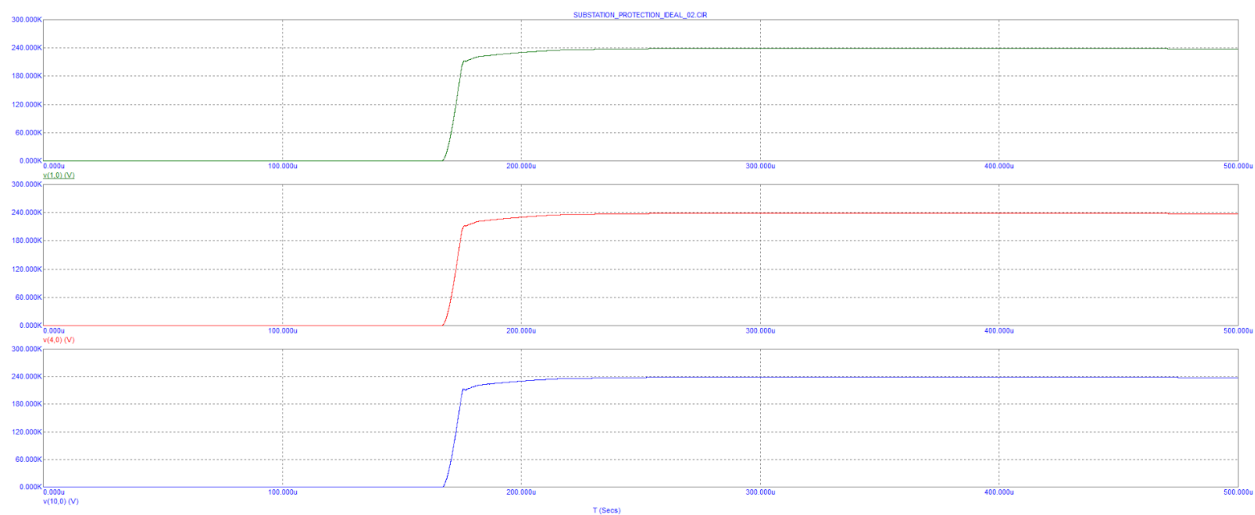


Рис. 3.3.18. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

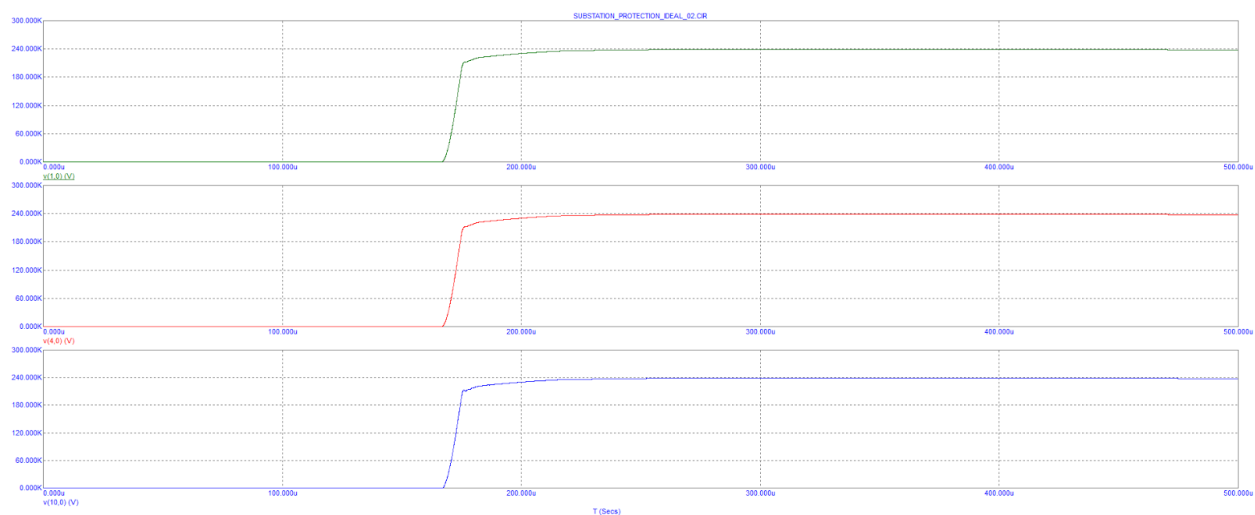


Рис. 3.3.19. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 15\text{м}$ ;

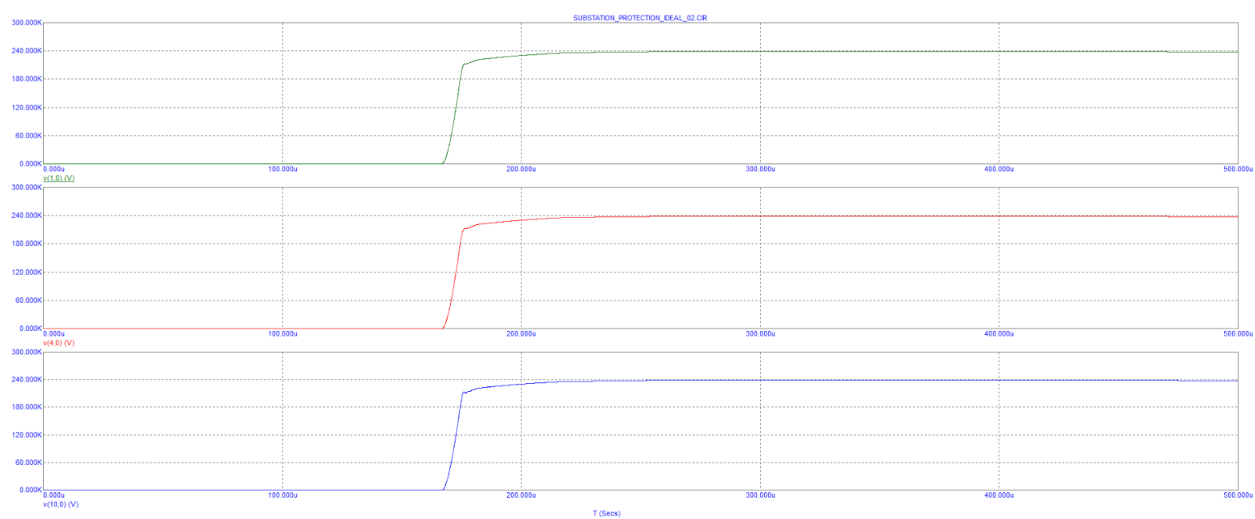


Рис. 3.3.20. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 20\text{м}$ ;

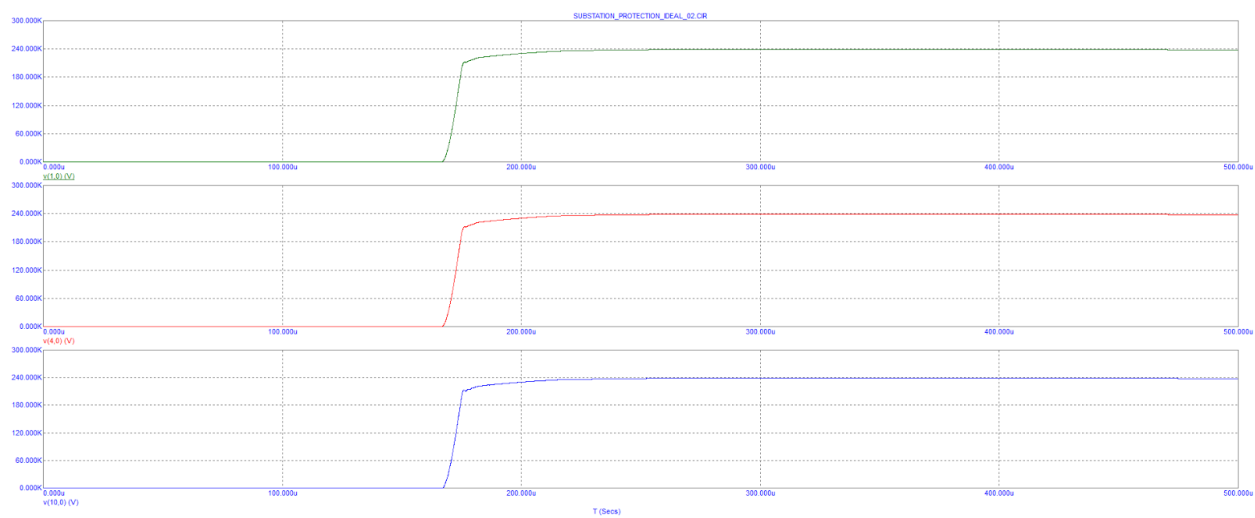


Рис. 3.3.20. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 25\text{м}$ ;

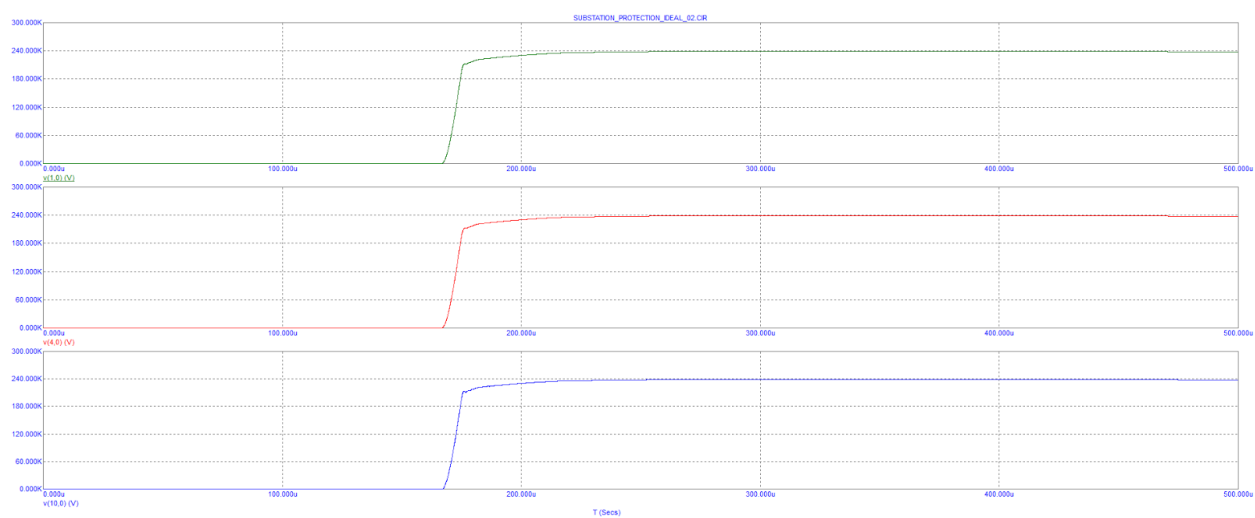


Рис. 3.3.21. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 30\text{м}$ ;

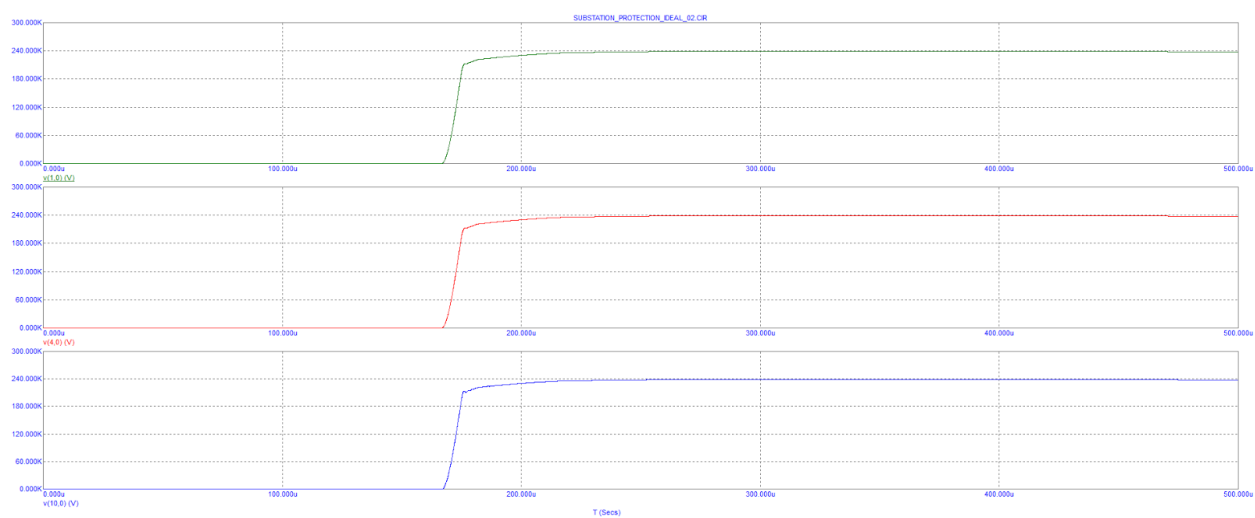


Рис. 3.3.22. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 50\text{м}$ ;



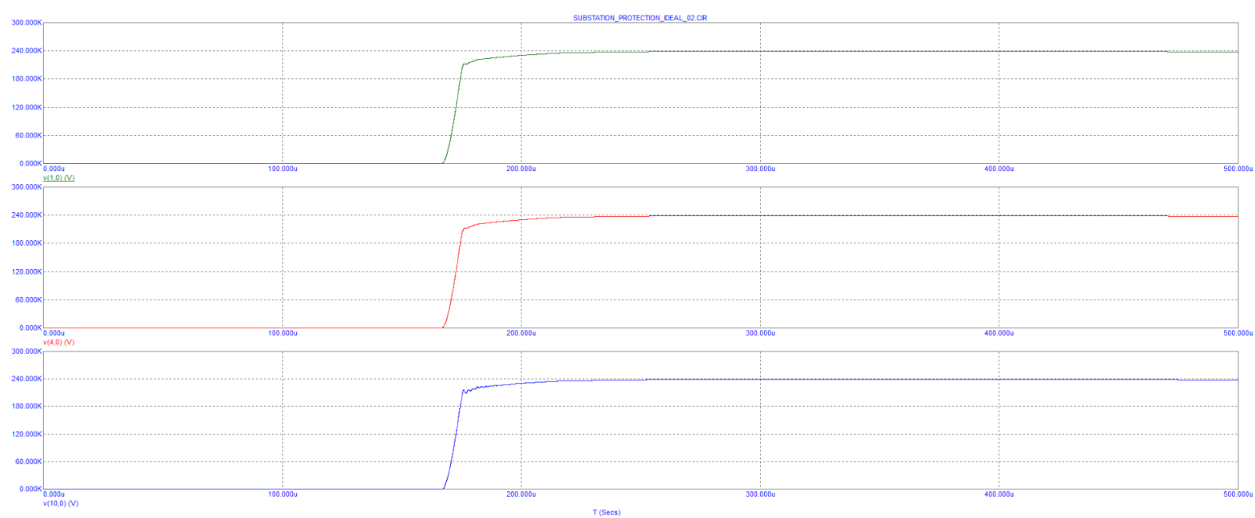


Рис. 3.3.23. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 20\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

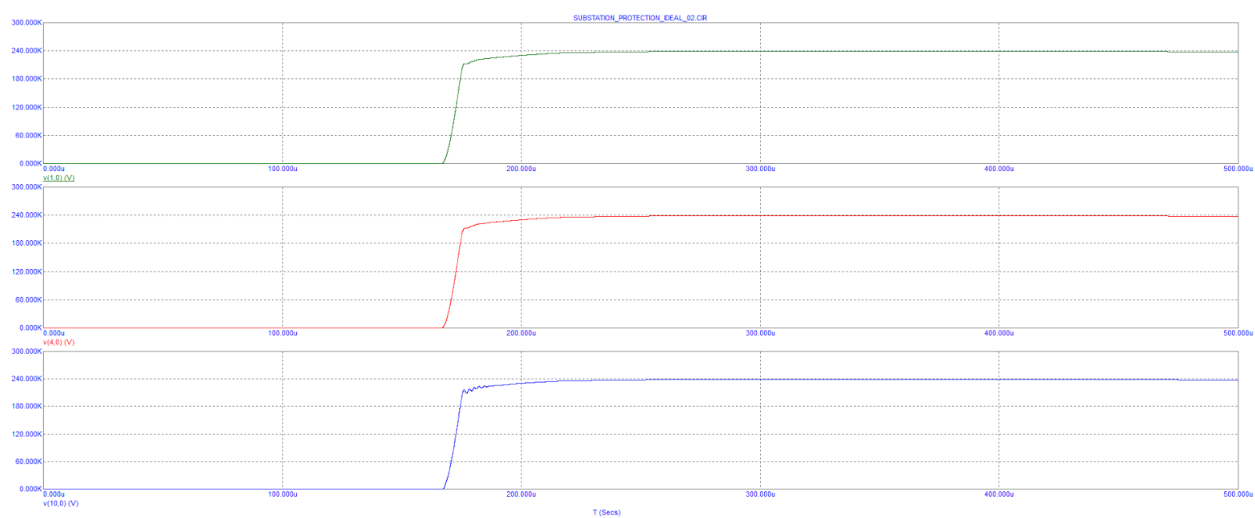


Рис. 3.3.24. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 25\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

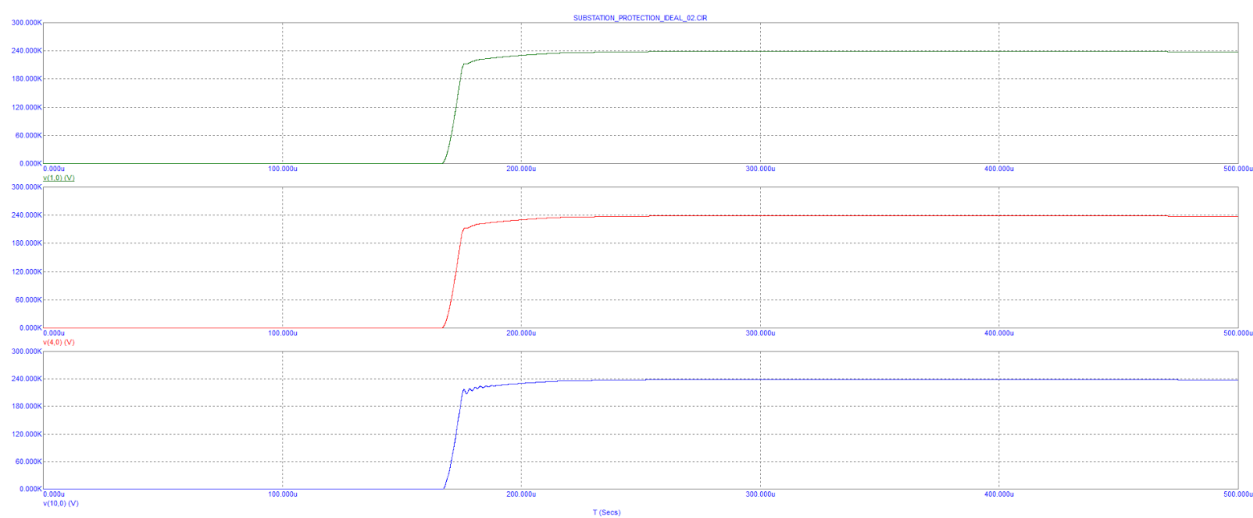


Рис. 3.3.25. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 30\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

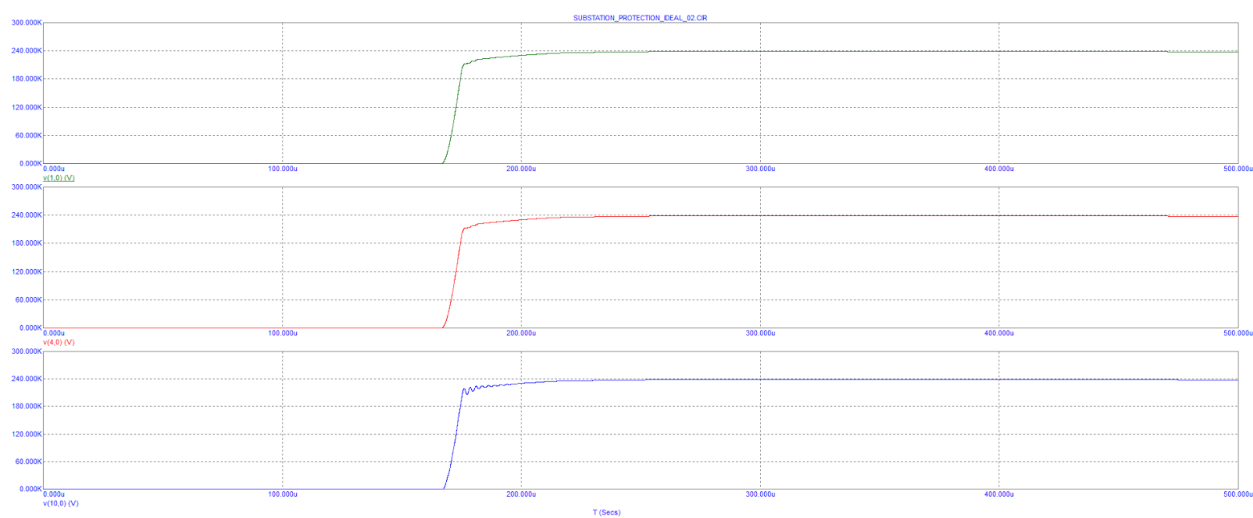


Рис. 3.3.26. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 35\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

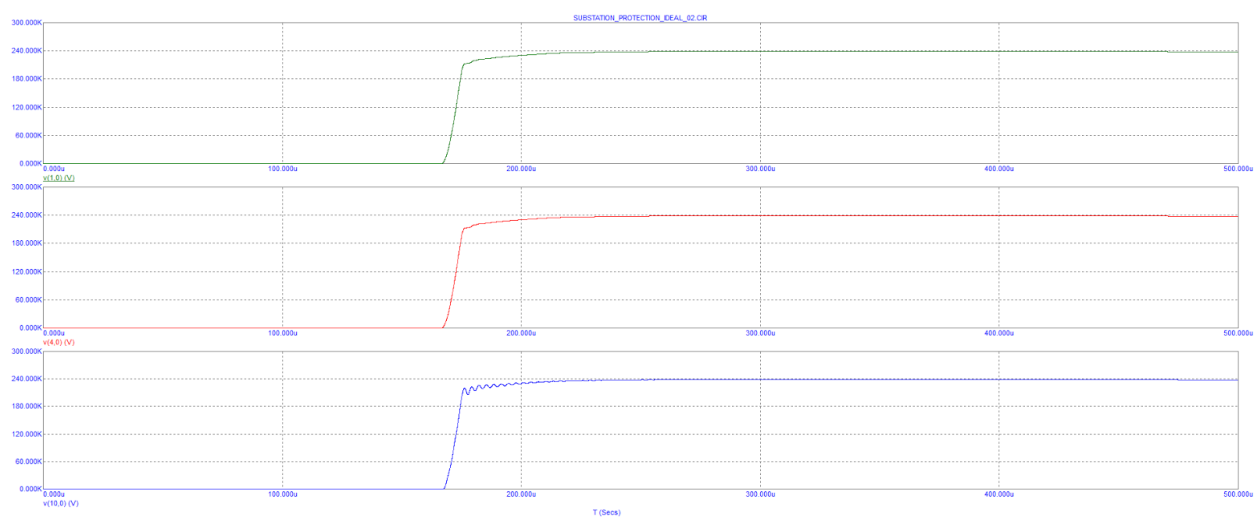


Рис. 3.3.27. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 50\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

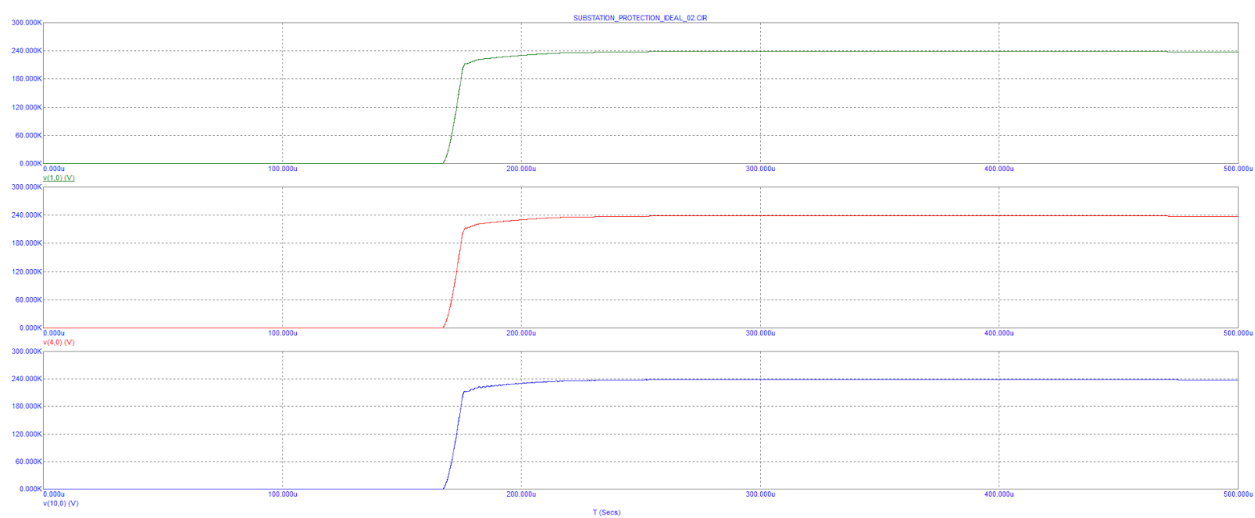


Рис. 3.3.28. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 40\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

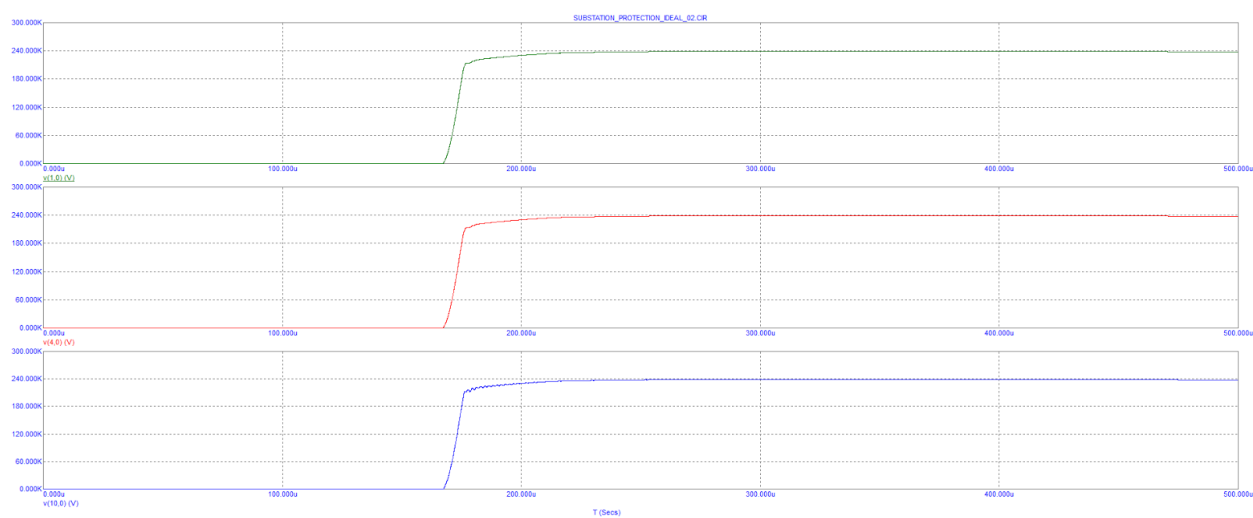


Рис. 3.3.29. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 50\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

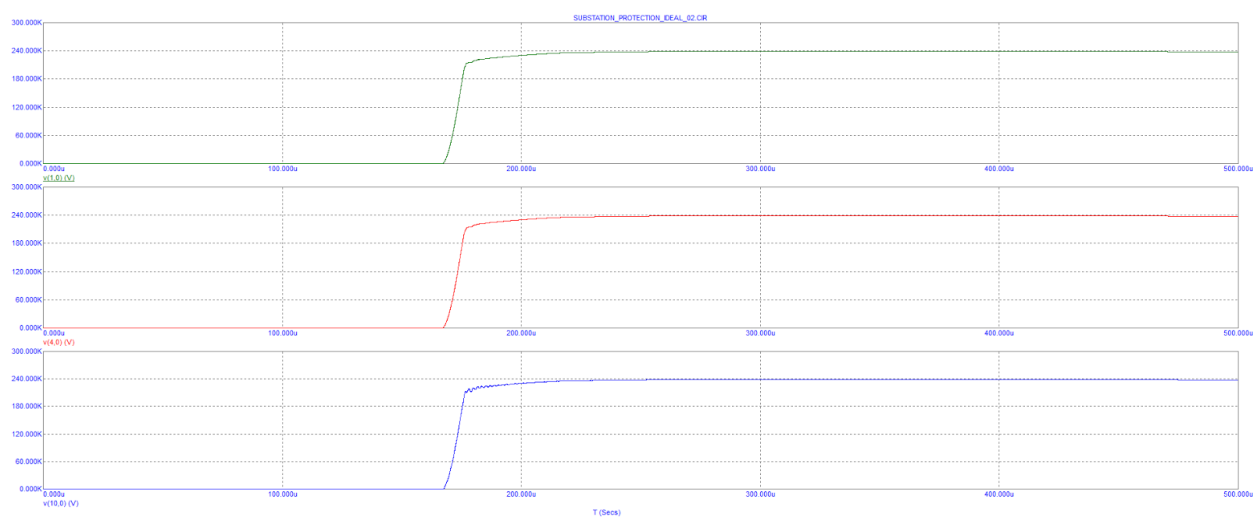


Рис. 3.3.30. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 60\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

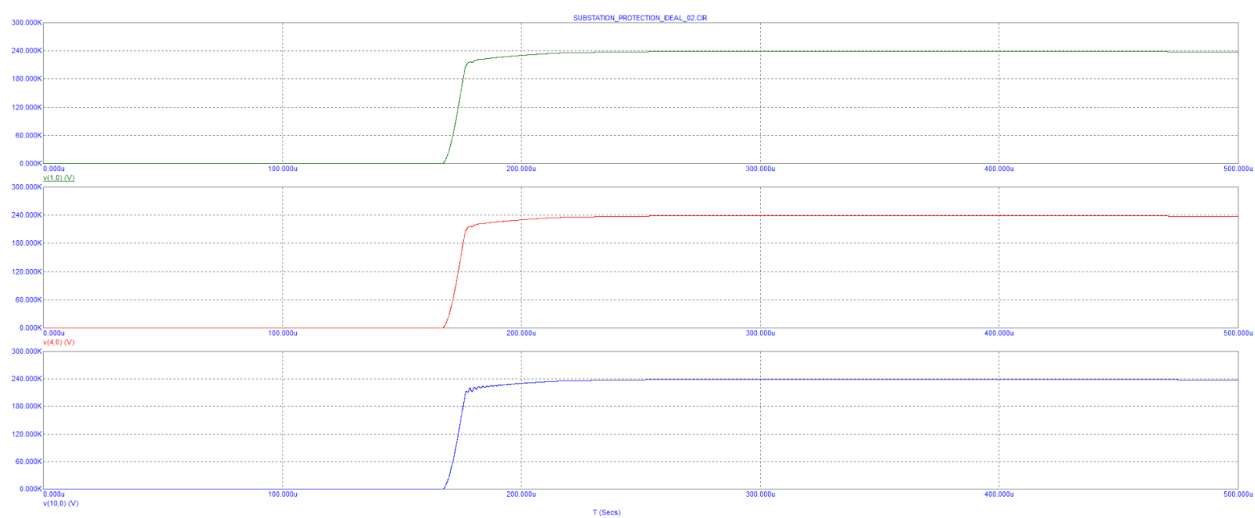


Рис. 3.3.31. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 70\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

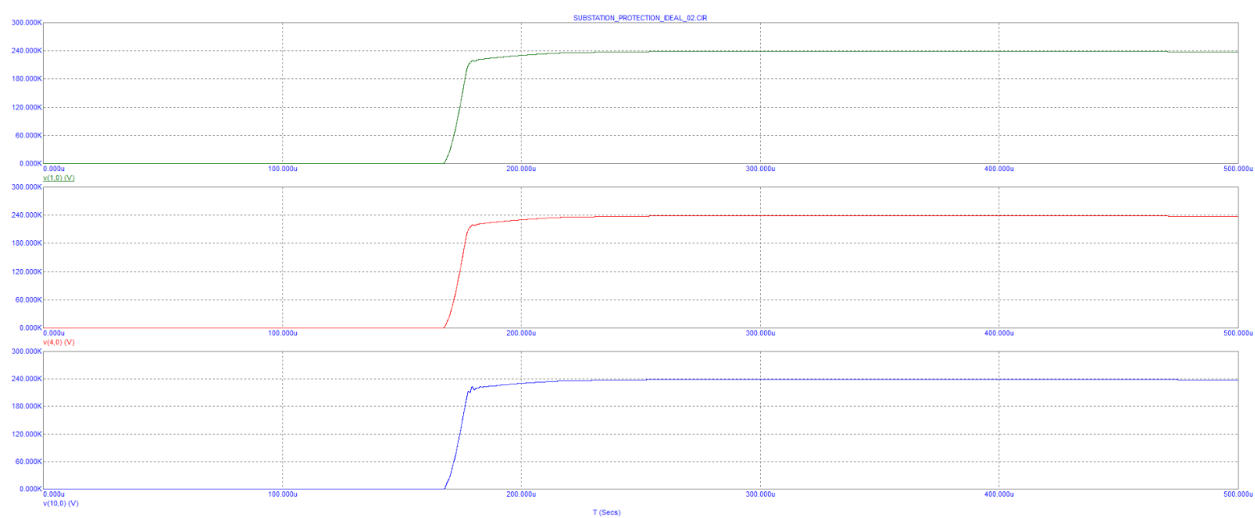


Рис. 3.3.32. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 100\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

### 3.3.3 Дослідження спрощеної схеми підстанції при дії комутаційного імпульсу напруги 250/2500 мкс.

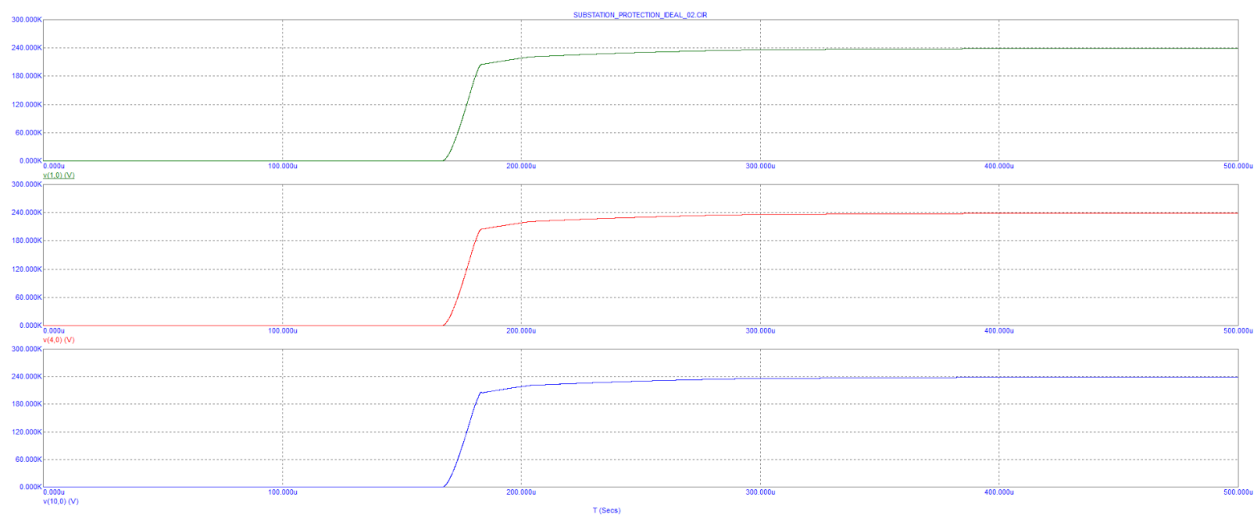


Рис. 3.3.33. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

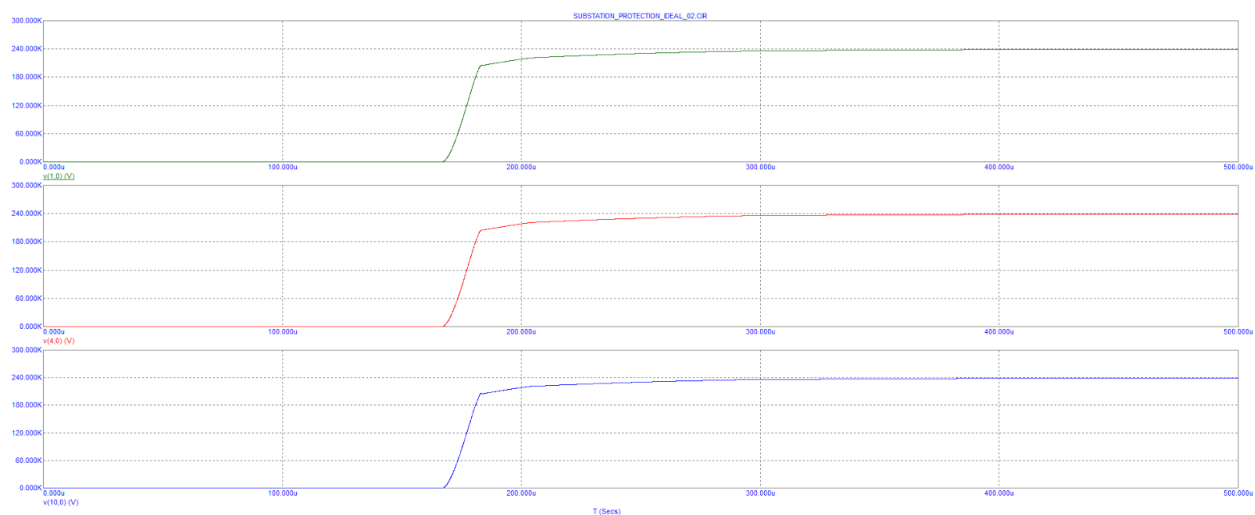


Рис. 3.3.34. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 15\text{м}$ ;

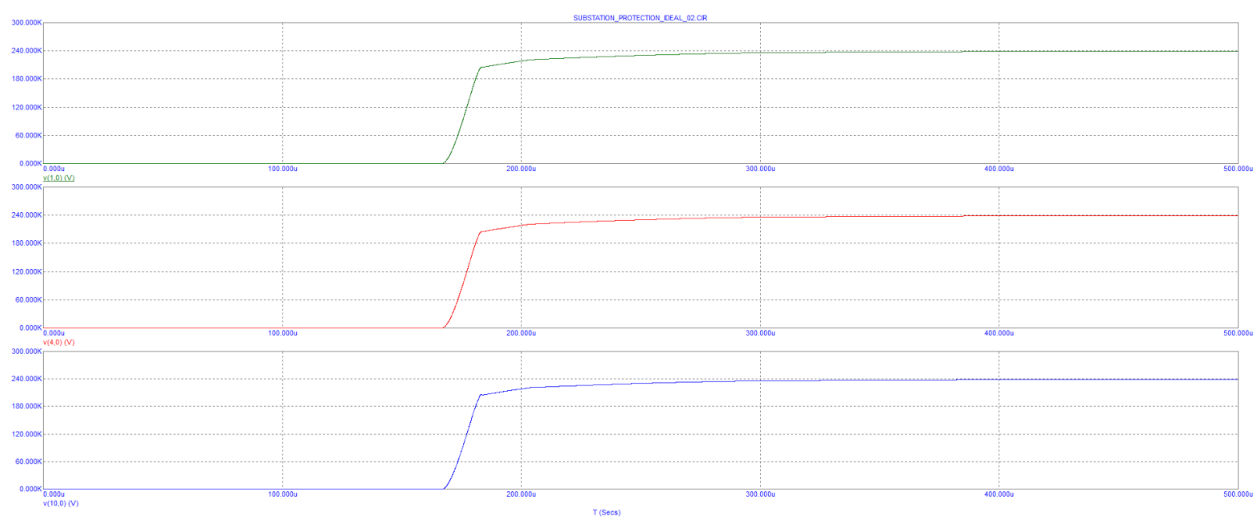


Рис. 3.3.35. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 20\text{м}$ ;

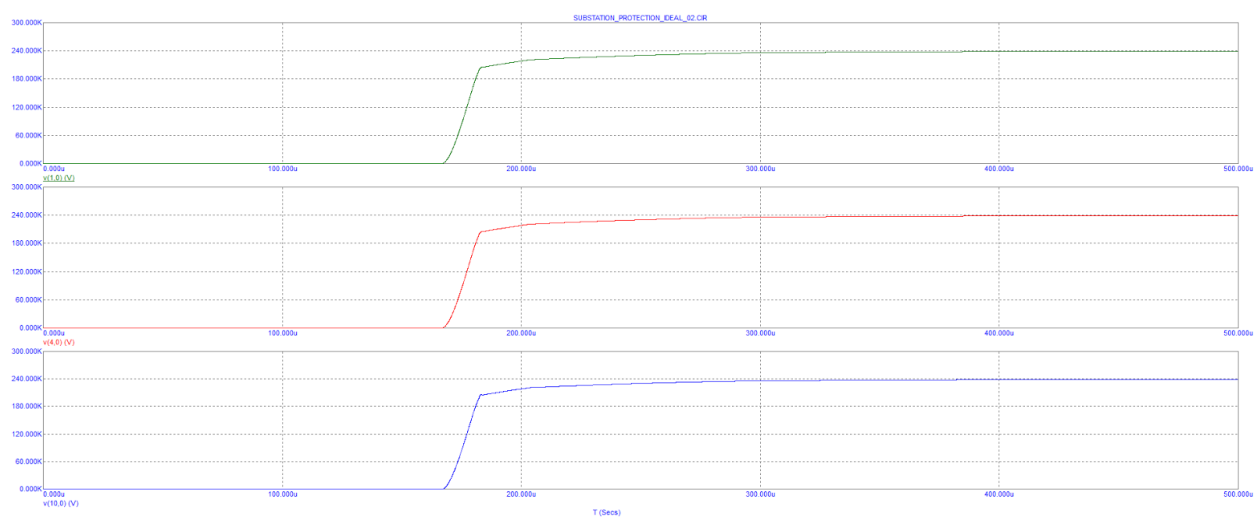


Рис. 3.3.36. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 25\text{м}$ ;

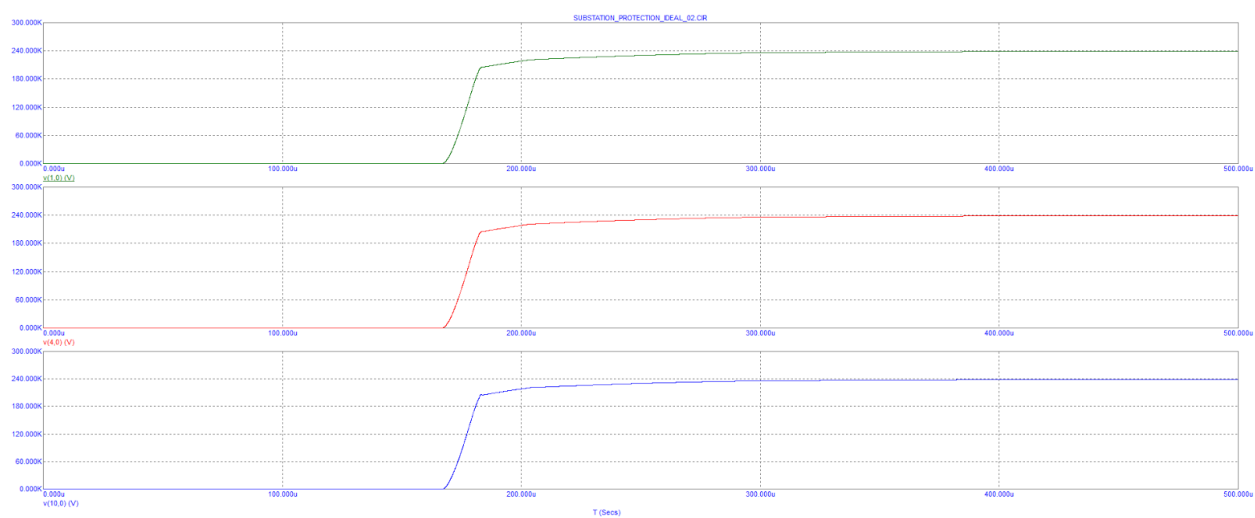


Рис. 3.3.37. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 30\text{м}$ ;

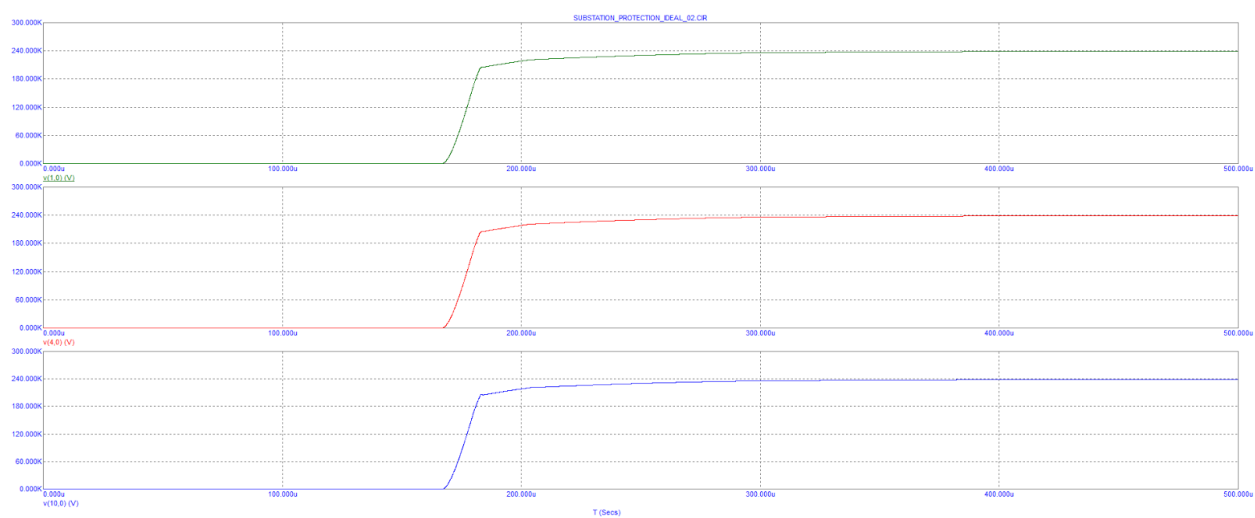


Рис. 3.3.38. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 50\text{м}$ ;



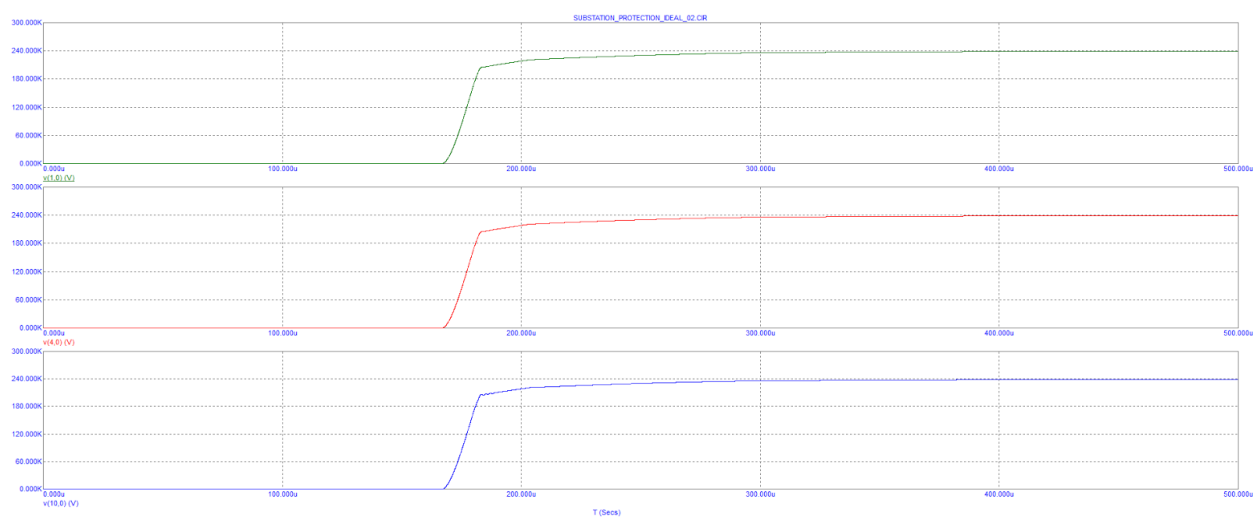


Рис. 3.3.39. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 20\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

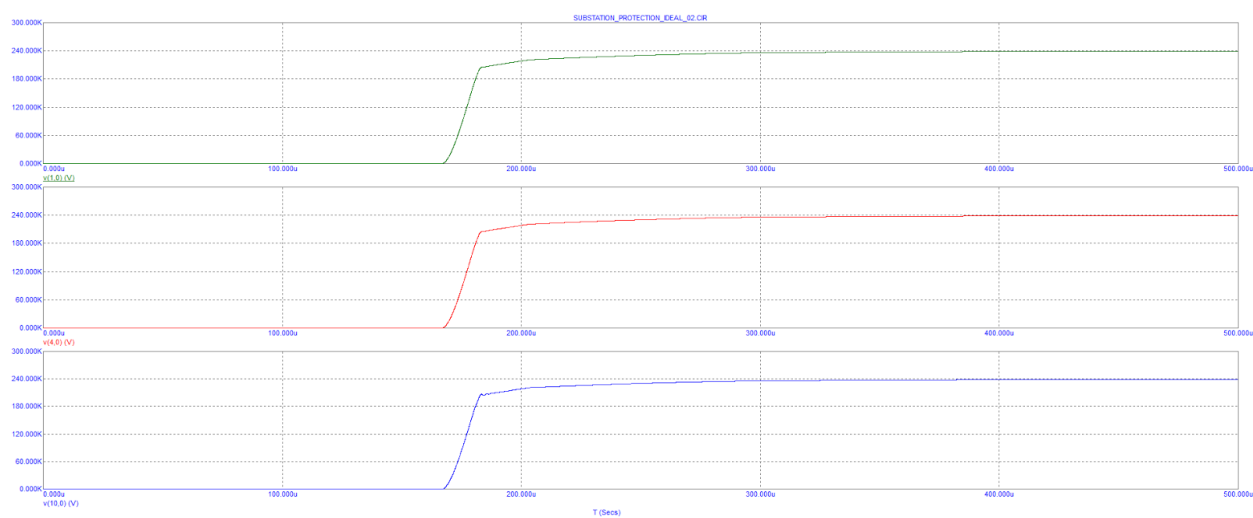


Рис. 3.3.40. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 25\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

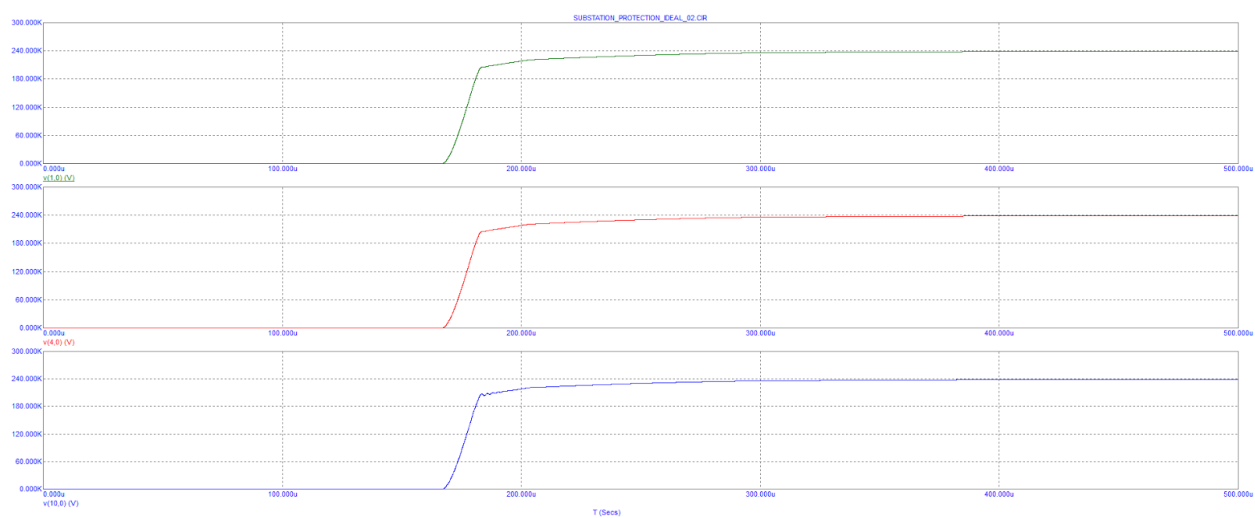


Рис. 3.3.41. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 30\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

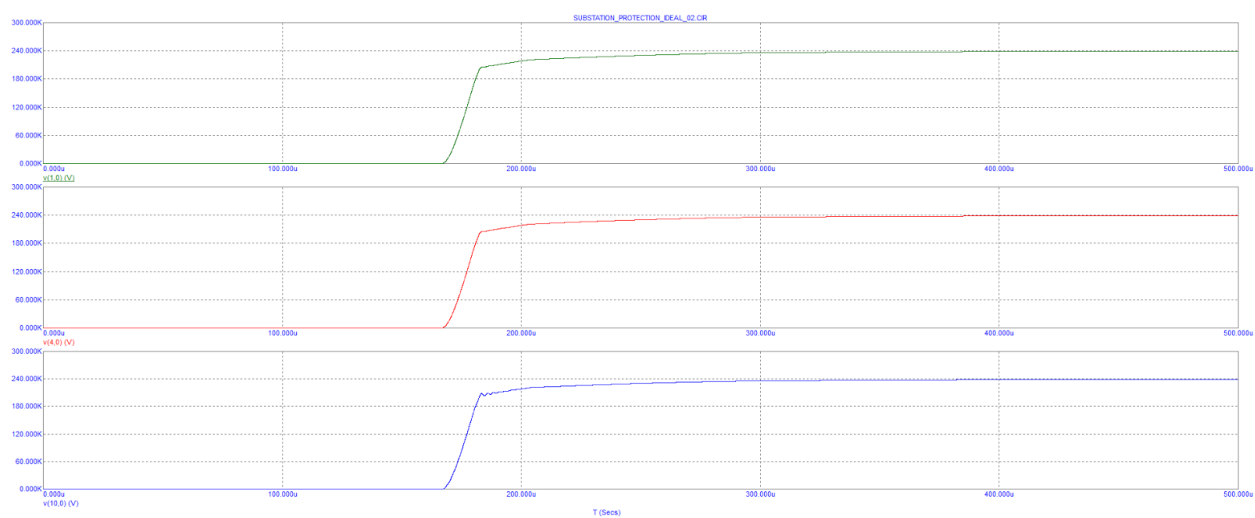


Рис. 3.3.42. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 35\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

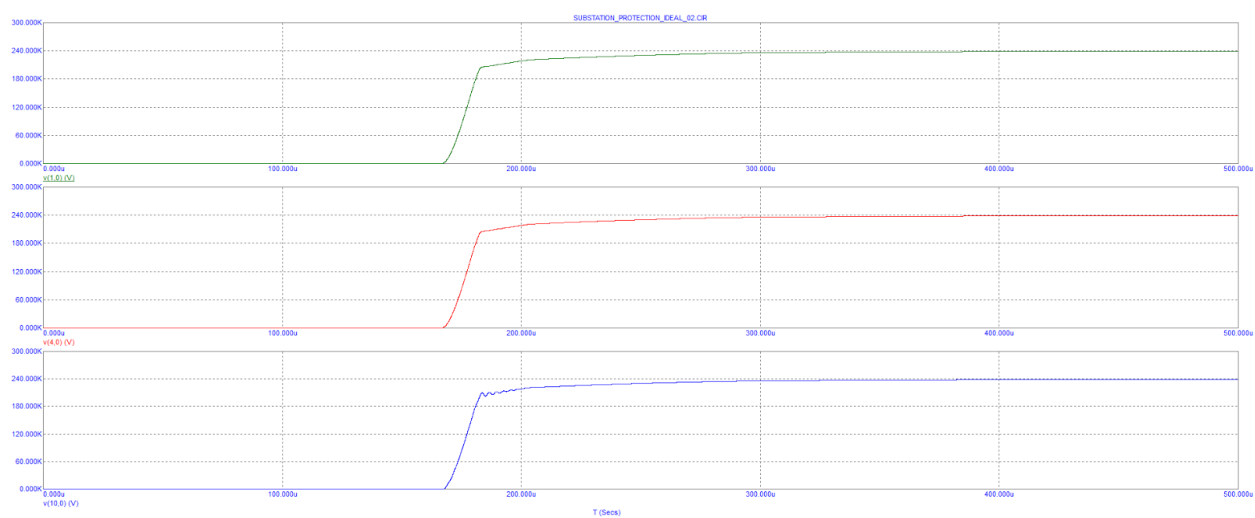


Рис. 3.3.43. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 30\text{м}$ ;  $T_3 = 50\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

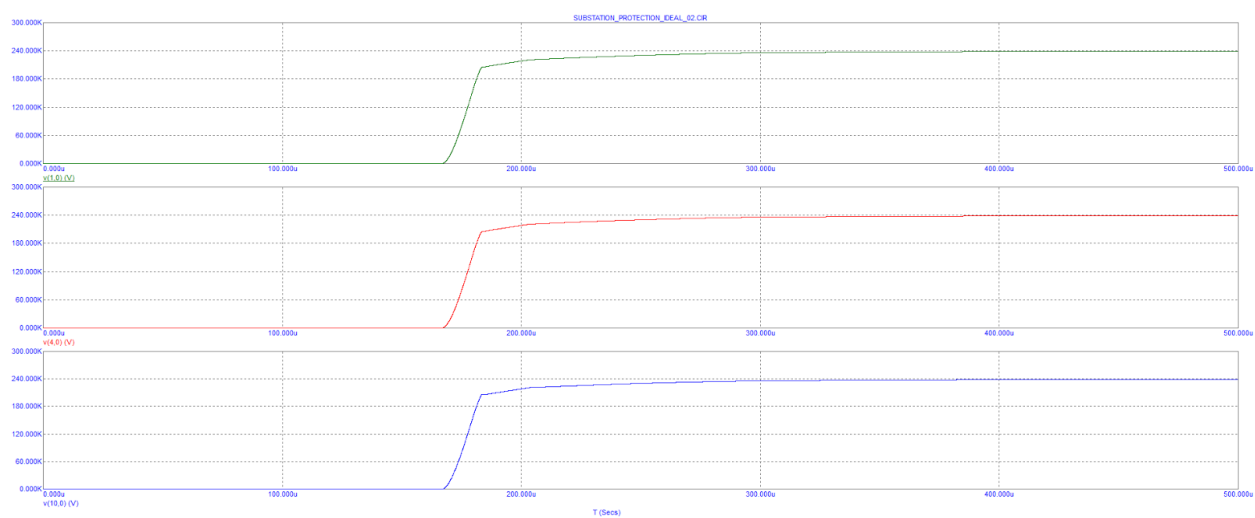


Рис. 3.3.44. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 40\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

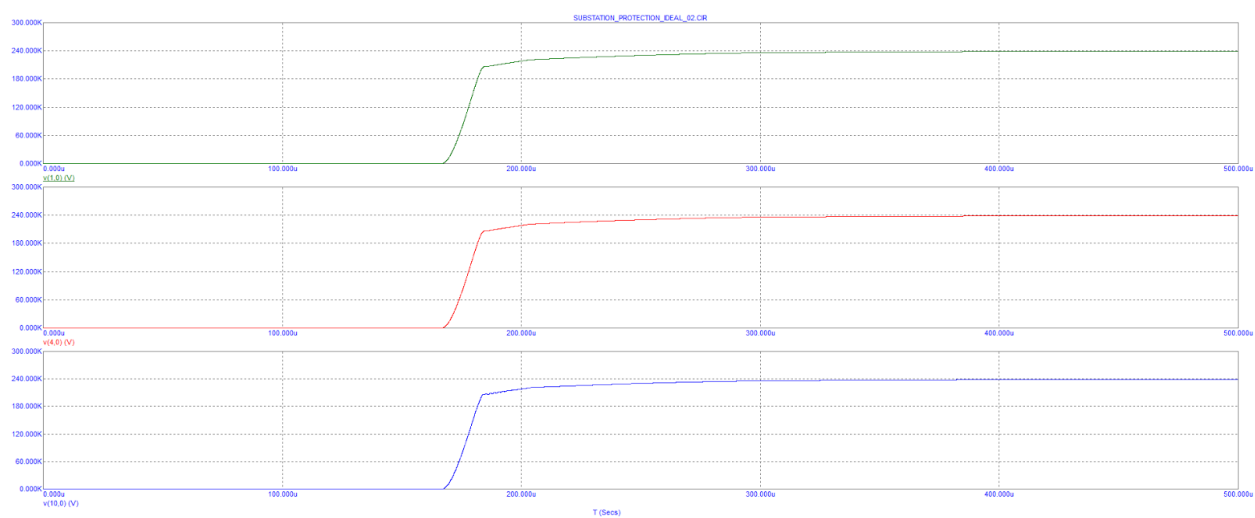


Рис. 3.3.45. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 50\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

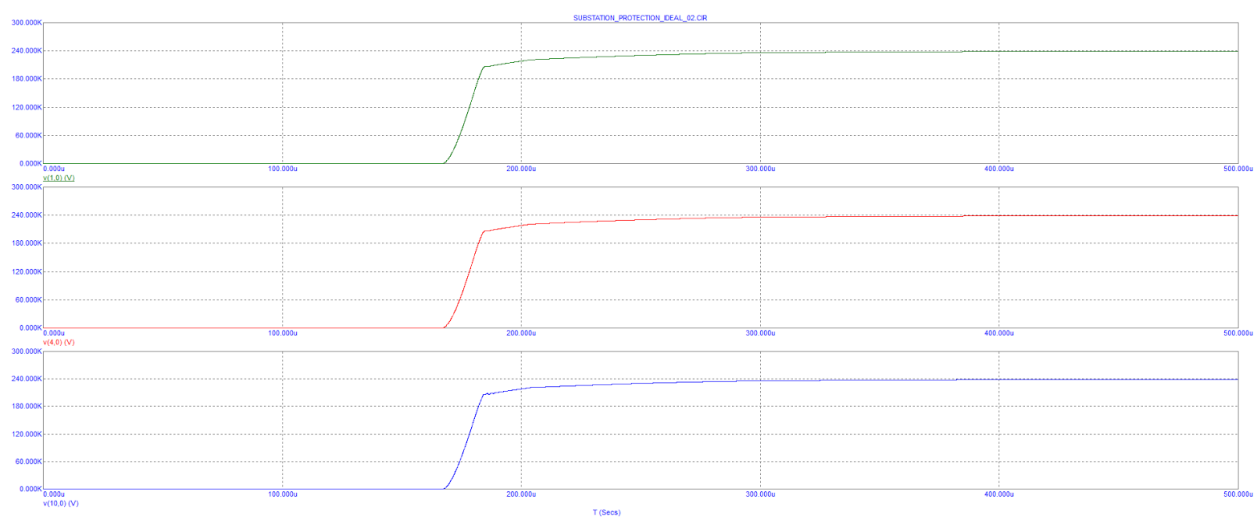


Рис. 3.3.46. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 60\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

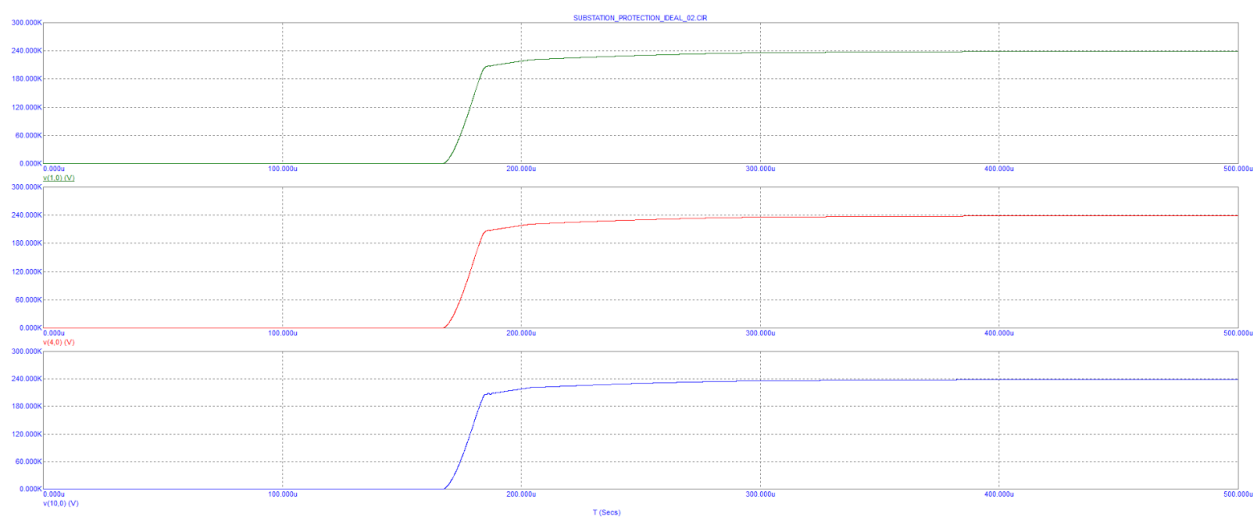


Рис. 3.3.47. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 70\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

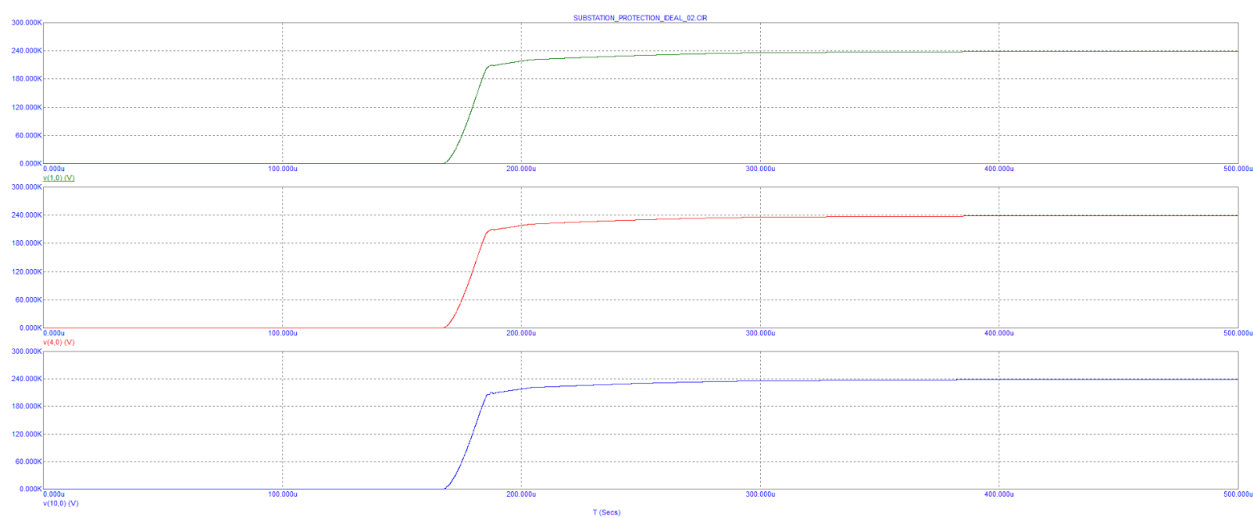


Рис. 3.3.48. Графіки напруг на схемі при  $T_2 = 100\text{м}$ ;  $T_3 = 15\text{м}$ ;  $T_4 = 10\text{м}$ ;

### 3.4. Схемотехнічне моделювання нелінійних обмежувачів перенапруг в MICRO-CAP EVALUATION VERSION

#### 3.4.1. Повна модель ОПН 1992 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version

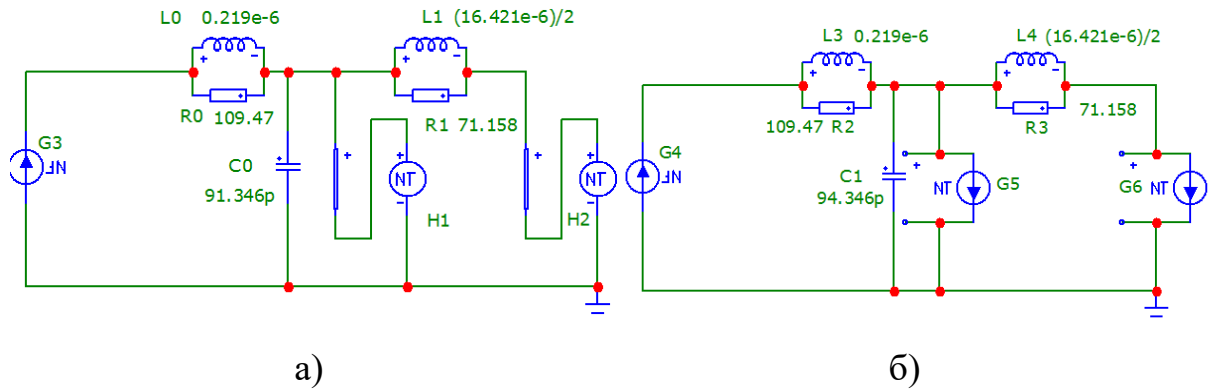
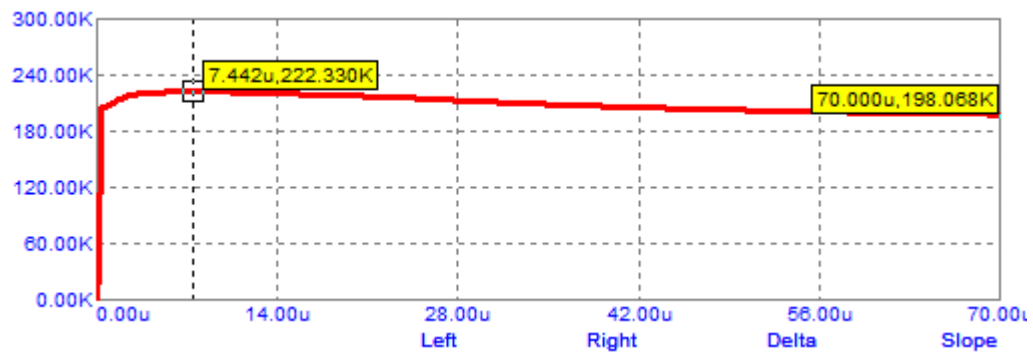
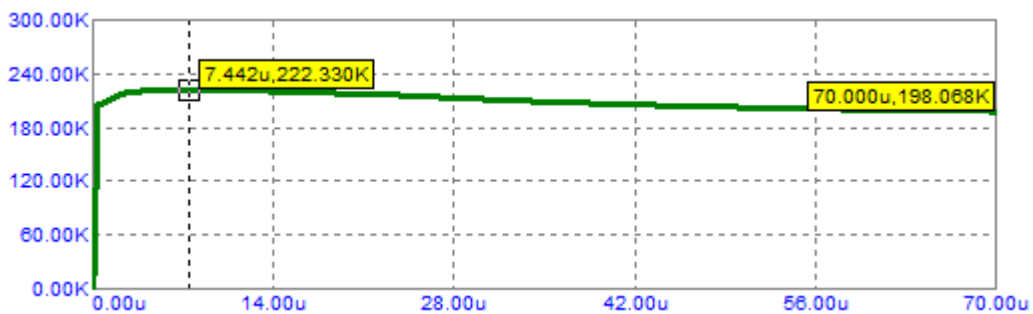


Рис 3.4.1. Повна модель 1992 року ОПН РВА3-96 в середовищі Micro-Cap: а – використовується джерело напруги, що керується струмом; б – використовується джерело струму, що керується напругою.

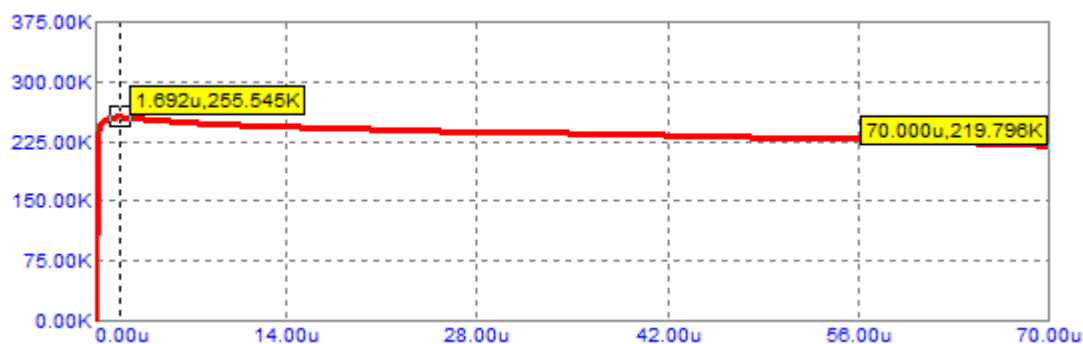


а)

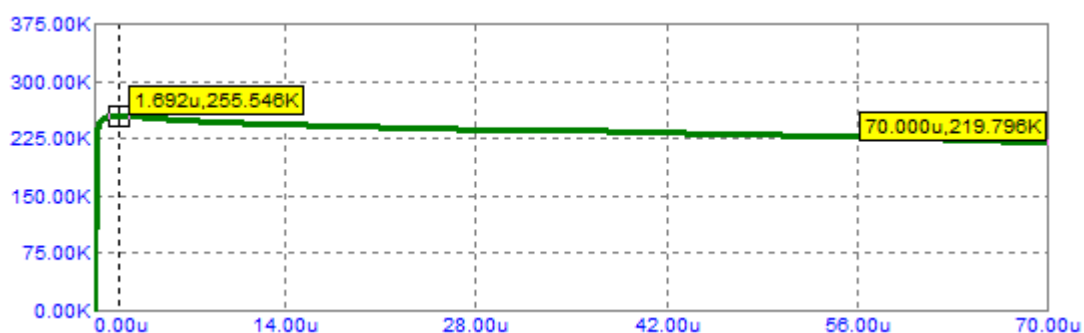


б)

Рис. 3.4.2. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 1,5 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.

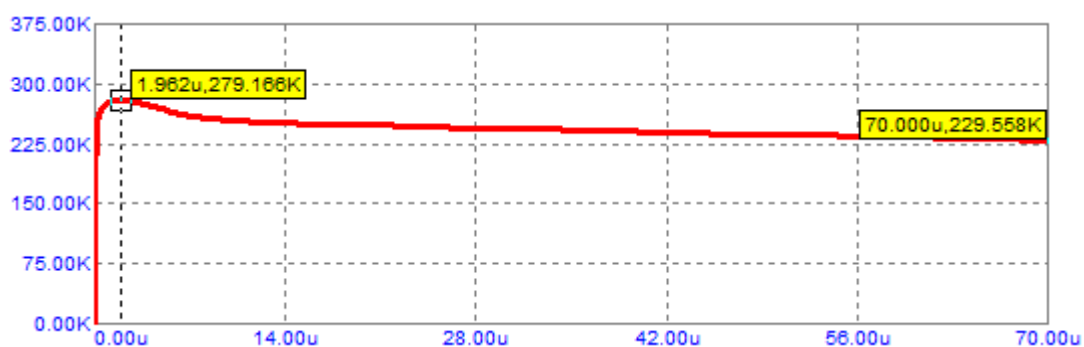


а)



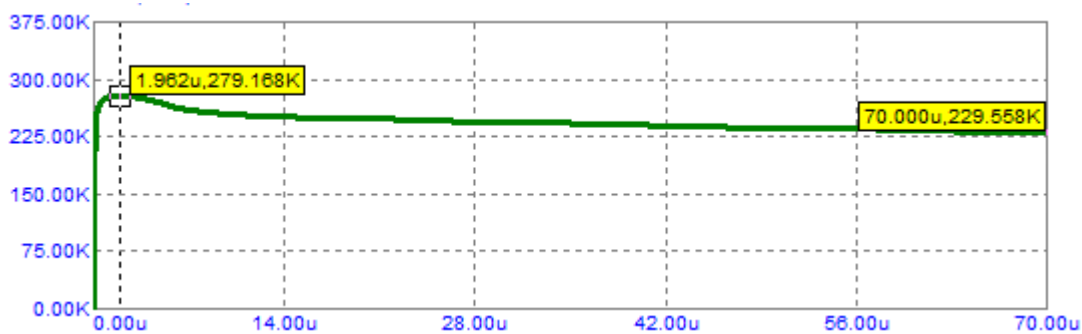
б)

Рис. 3.4.3. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 10 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.



а)

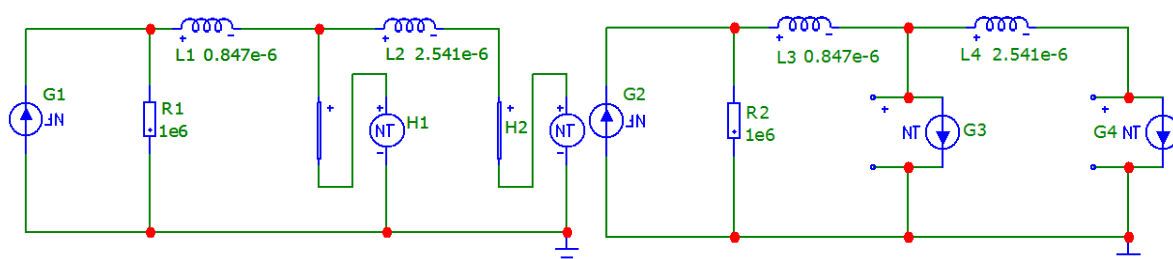
Рис. 3.4.4. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 20 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом



б)

Рис. 3.4.5. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-108 при проходженні через нього струму 20 кА (продовження): б) – використовується джерело струму, що керується напругою.

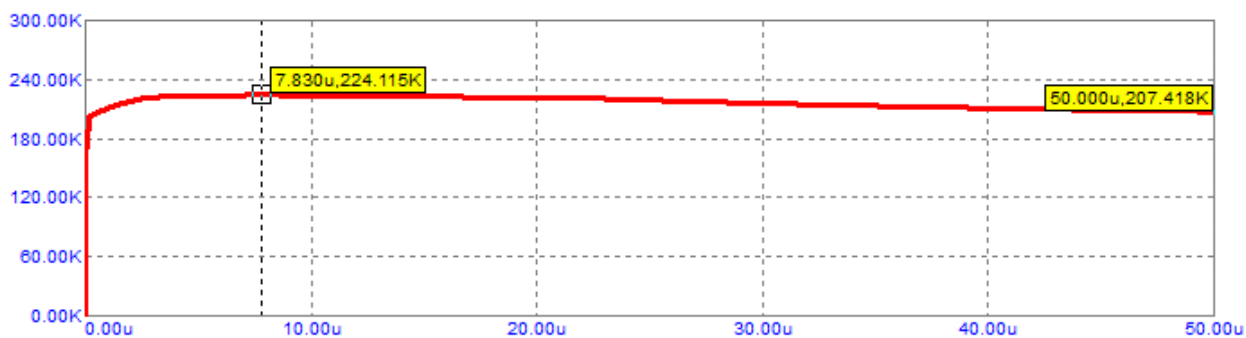
### 3.4.2. Спрощена модель ОПН 1999 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version



а)

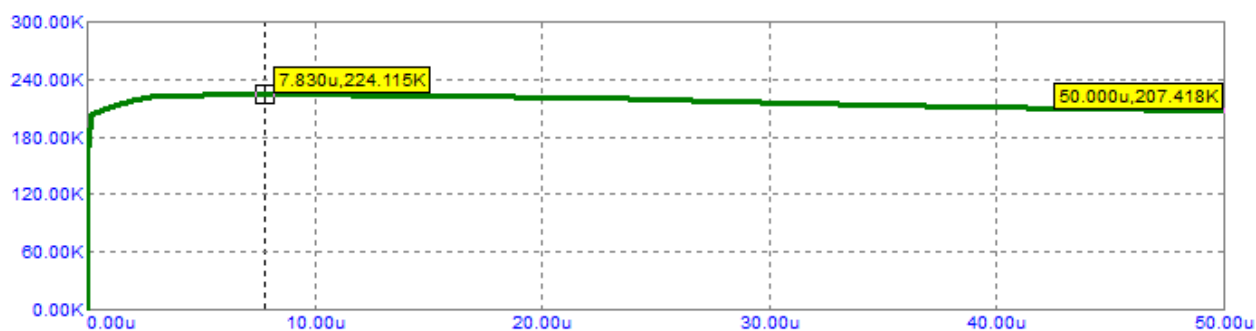
б)

Рис. 3.4.6. Спрощена модель 1999 року ОПН РВА3-96 в середовищі Micro-Cap: а – використовується джерело напруги, що керується струмом; б – використовується джерело струму, що керується напругою.



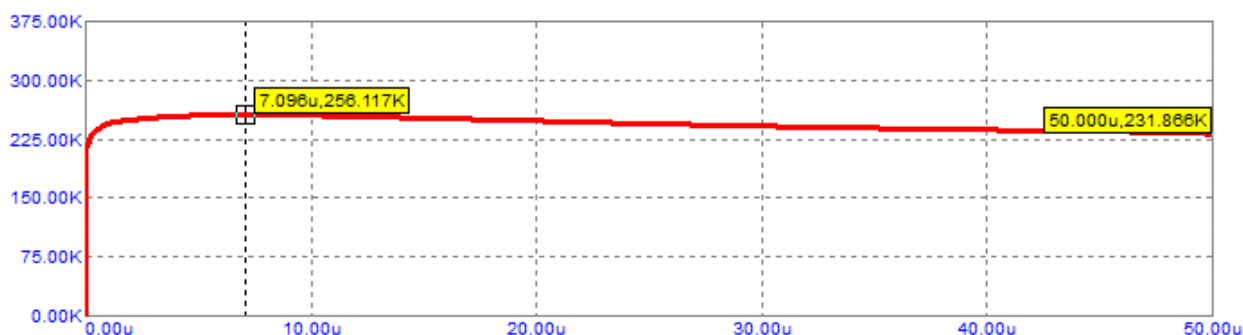
а)





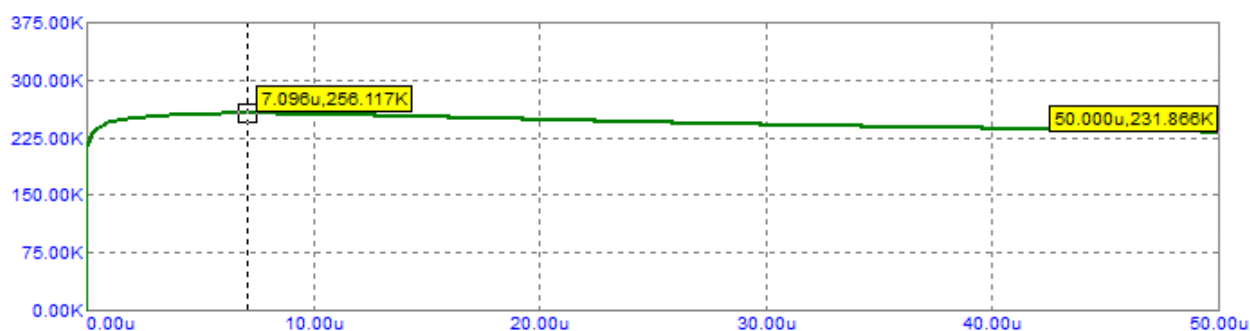
б)

Рис. 3.4.7. Залишкова напруга на ОПН типу RVA3-96 при проходженні через нього струму 1,5 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.



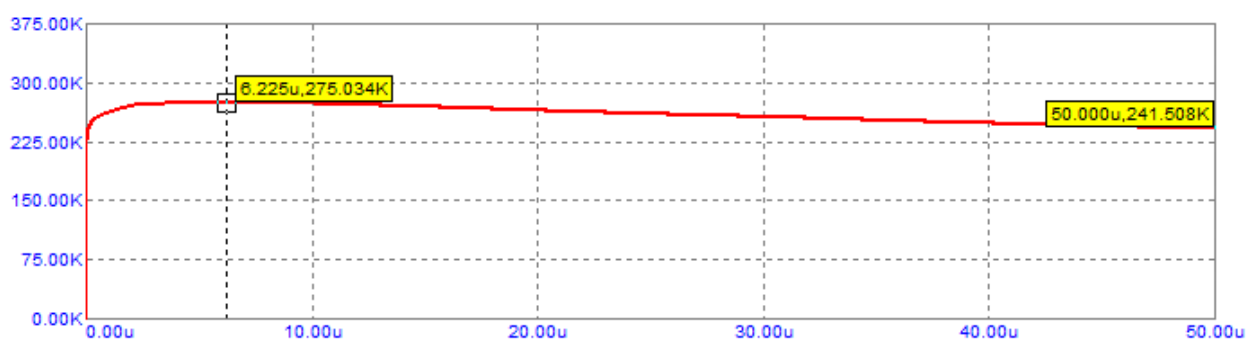
а)

Рис. 3.4.8. Залишкова напруга на ОПН типу RVA3-96 при проходженні через нього струму 10 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом.

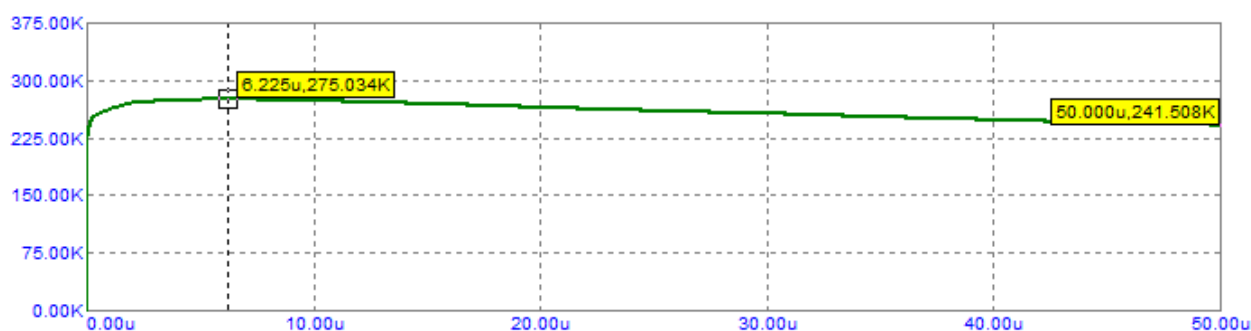


б)

Рис. 3.4.9. Залишкова напруга на ОПН типу RVA3-96 при проходженні через нього струму 10 кА (продовження): б) – використовується джерело струму, що керується напругою.



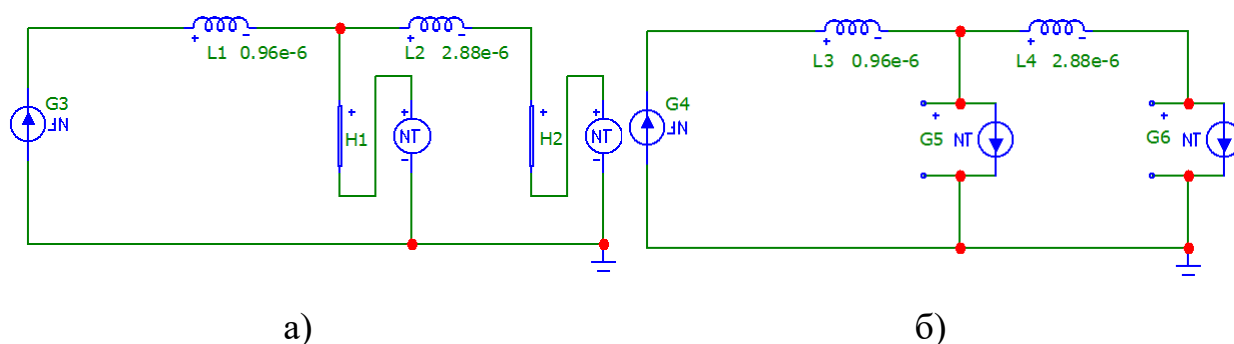
а)



б)

Рис. 3.4.10. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 20 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.

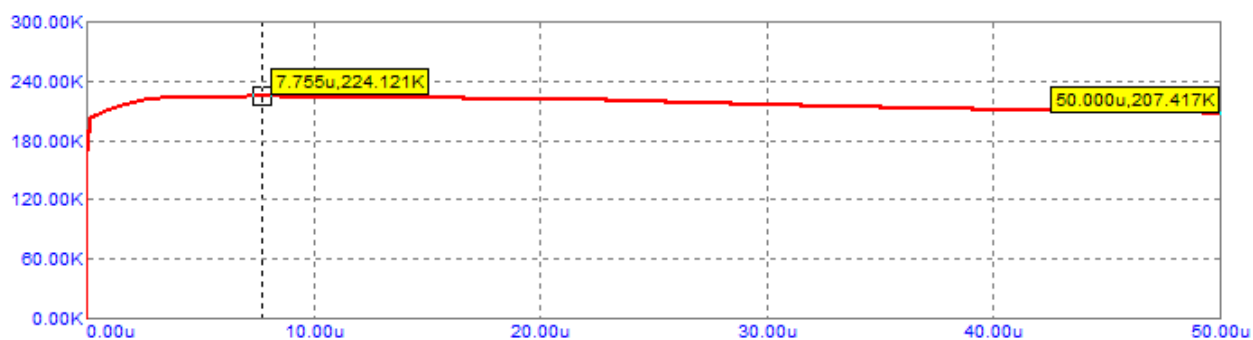
### 3.4.3. Спрощена модель ОПН 2004 року та її реалізація в Micro-Cap Evaluation Version



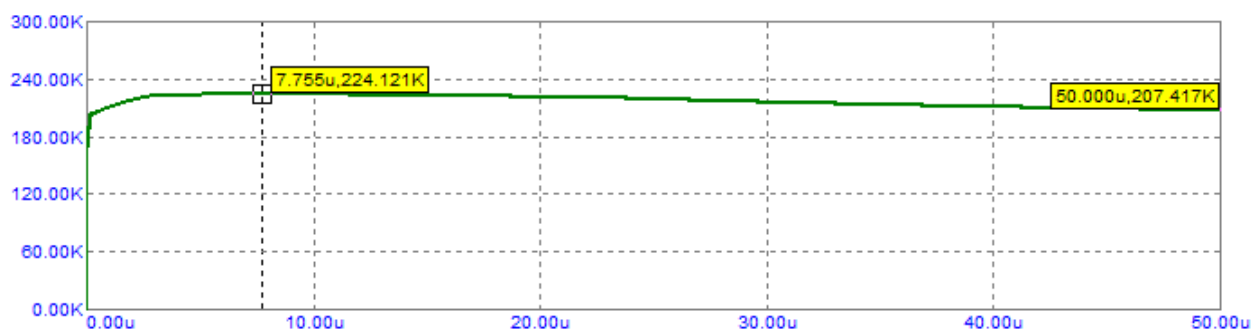
а)

б)

Рис. 3.4.11. Спрощена модель 2004 року ОПН РВА3-96 в середовищі Micro-Cap: а) – використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.

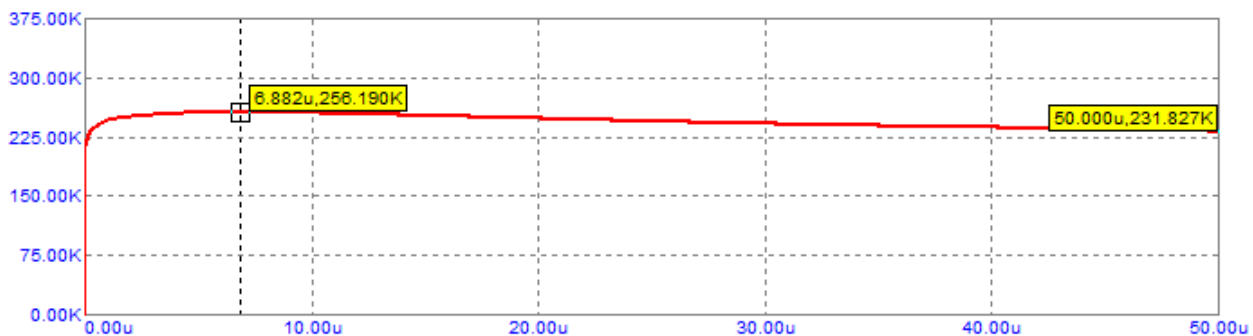


а)

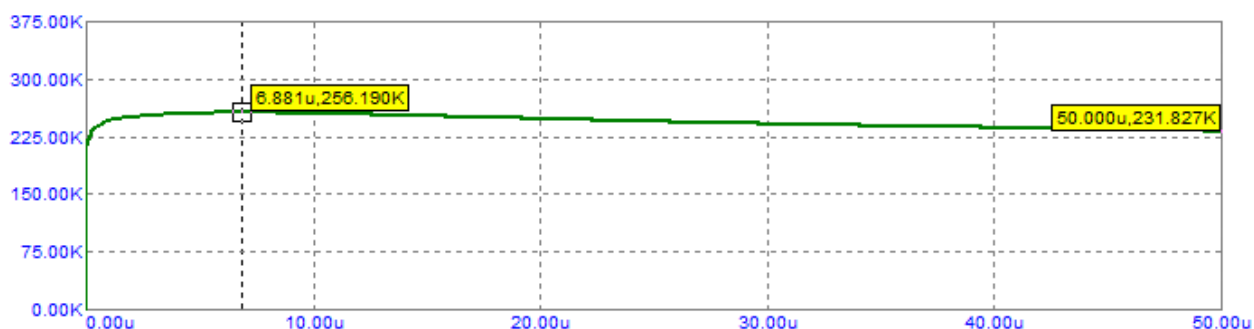


б)

Рис. 3.3.12. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 1,5 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.

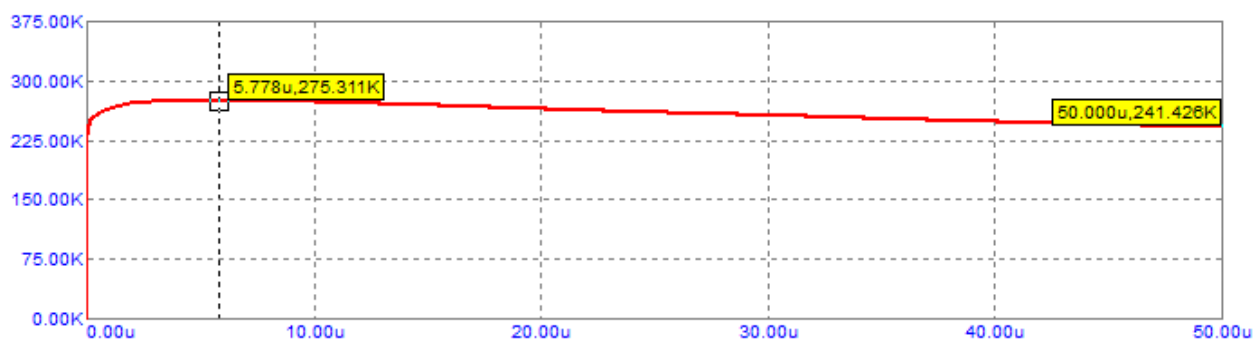


а)



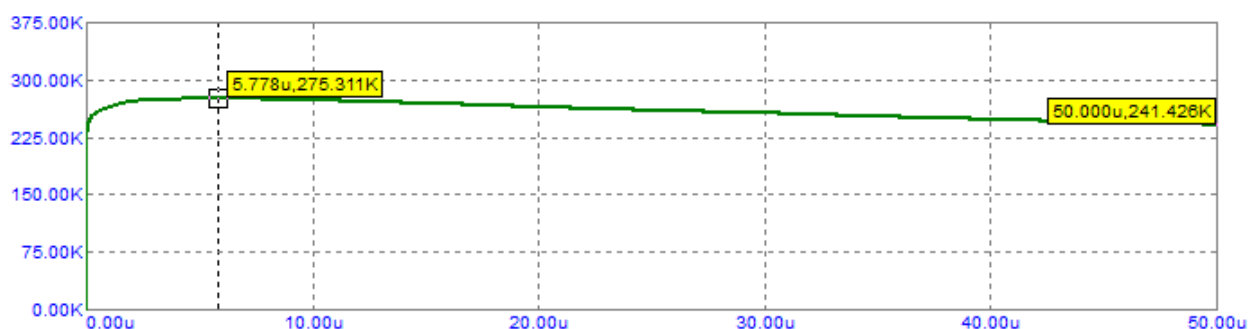
б)

Рис. 3.4.13. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 10 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом; б) – використовується джерело струму, що керується напругою.



а)

Рис. 3.4.14. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 20 кА: а) - використовується джерело напруги, що керується струмом.



б)

Рис. 3.4.15. Залишкова напруга на ОПН типу РВА3-96 при проходженні через нього струму 20 кА (продовження): б) – використовується джерело струму, що керується напругою

### 3.5. Висновки по розділу 3

Як і очікувалося, вплив відстані між ОПН та об'єктом підтвердився, при вказаних в табл. 3.2.1 значеннях імпульсів та за допомогою програмного забезпечення Micro-Cap 11 Evaluation Version, а також схеми на рис. 3.3.

При грозовому імпульсі (1.2/50 мкс), без ОПН максимальні значення перенапруг сягнули 2 мВ, однак з використанням обмежувача ці показники при різних відстанях наступні

при відстані 1м між ОПН та об'єктом 305 кВ (зниження на 84.75 %);

при відстані 3м між ОПН та об'єктом 335 кВ (зниження на 83.25 %);

при відстані 100м між ОПН та об'єктом 516 кВ (зниження на 74.2 %);

при відстані 250м між ОПН та об'єктом 558 кВ (зниження на 72 %);

Також, виявилось, що відстань між ОПН та об'єктом не впливає на значення перенапруг при комутаційних імпульсах 100/1000 мкс. та 250/2500 мкс.

Після комплексного дослідження схеми (рис 3.3.1) під впливом грозового імпульсу 1.2/50 мкс. наведеної вище виходить, що на значення напруги суттєво впливає тільки відстань між ОПН та розподільчим трансформатором. При зміні відстаней між ОПН та ємнісним і силовим трансформатором зафіксовано зміну максимальних значень напруги лише на кілька відсотків. Під впливом комутаційних імпульсів 100/1000 мкс. та 250/2500 мкс. відстань між ОПН та елементами схеми, як і для першої схеми, на впливає на значення перенапруг.

Таким чином доцільно дотримуватися мінімальноможливої відстані між ОПН та об'єктом тільки для захисту від грозових імпульсів 1.2/50 мкс.

## 4. СТАРТАП-ПРОЕКТ

Розділ має на меті проведення маркетингового аналізу стартап проекту задля визначення принципової можливості його ринкового впровадження та можливих напрямів реалізації цього впровадження.

### 4.1. Опис ідеї проекту

Установка на опорах ПЛ нелінійних обмежувачів перенапруг.

Грозозахист ПЛ 330 кВ від прямих ударів блискавки повинна здійснюватися за допомогою заземлених тросів по всій довжині ПЛ. Однак в районах із забрудненою атмосферою грозозахисний трос швидко корозує, що призводить до його обриву і важким аварійним наслідків.

Для підвищення грозоупорності ВЛ пропоную установку на ВЛ лінійних обмежувачів перенапруг (ОПН) типу ОПНп-330/210/10/850-III-УХЛ1. ВЛ - одноланцюгова, на опорах порталного типу ПБ-330.

Таблиця 4.1

### Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Вигоди для користувача</i>
Установка ОПН типу ОПНп-330/210/10/850-III-УХЛ1 на територію з забрудненою атмосферою на одноланцюгову ВЛ, з опорами порталного типу ПБ-330	Захист повітряних ліній з опорами порталного типу ПБ-330	Високий рівень захист ВЛ від перенапруг в важкодоступних районах.

Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї (чим відрізняється від існуючих аналогів та замінників) порівняно із пропозиціями конкурентів передбачає:

- визначення переліку техніко-економічних властивостей та характеристик ідеї;

- визначення попереднього кола конкурентів (проектів-конкурентів) або товарів-замінників чи товарів-аналогів, що вже існують на ринку, та проводиться збір інформації щодо значень техніко-економічних показників для ідеї власного проекту та проектів-конкурентів відповідно до визначеного вище переліку;

- проводиться порівняльний аналіз показників: для власної ідеї визначаються показники, що мають а) гірші значення (W, слабкі); б) аналогічні (N, нейтральні) значення; в) кращі значення (S, сильні) (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

**Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик  
ідеї проекту**

№ п/ п	Техніко- економічні характерист ики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів			W  (слабка сторона )	N  (нейтральн а сторона)	S  (сильна сторона)
		Мій проект	ВЛ без тросів;	ВЛ з тросами;			
1.	Собівартість	середня	низька	середня		середня собівартість серед конкурентів	
2.	Продажна вартість	висока	середня	середня			Найвища продажна вартість
3.	Надійність	надійний	менш надійний	не надійний			Є надійним
4.	Обслуговуван ня	простий	менш простий	простий			Простий в обслуговуванні
5.	Точність вимірювання	висока	середня	середня			Висока точність вимірювань.

Визначений перелік слабких, сильних та нейтральних характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

## 4.2. Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/добробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 5.3

### Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ n/n	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1	Установка ОПН в територію з забрудненою атмосферою на одноланцюгову ВЛ, з опорами порталного типу ПБ-330.	Розгортання виготовлення здійснюється автором проекту згідно з умовами середовища.	Доступні всі технології, необхідні для виготовлення.	Автор проекту (розробник) веде безпосередній контроль процесу виготовлення, надаючи документацію та необхідні консультації
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Розгортання виготовлення здійснюється автором проекту.				

За результатами аналізу таблиці робиться висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: так чи ні, а також технологічного шляху,



яким це доцільно зробити (з поміж названих технологій обираються такі, що доступні авторам проекту та є наявними на ринку).

#### 4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Проведений аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4).

Таблиця 4.4

#### Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	2
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	16000 \$
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Сертифікація
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Проводиться 1 раз на три роки
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	25 %

Середня норма рентабельності проекту більша за середній банківський відсоток на вкладення, тому ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Надалі визначаються потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та формується орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (табл. 4).

Таблиця 4.5

### Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Потреба в захисті ВЛ на території з забрудненою атмосферою	- Виробники ВЛ - Організації, що експлуатують ВЛ	- Необхідність перевірки захисту ВЛ. - Необхідність захисту з урахуванням умов середовища.	Відповідність характеристикам, що зазначені у сертифікаті та в описі типу.

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (табл. № 4.6-7). Фактори в таблиці подано в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6

#### Фактори загроз

№ n/n	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1	Неусвідомленість споживачів	Неусвідомленість користі товару, ризику споживача	Донесення інформації через сайт у вигляді реклами, відео. Влаштування конференцій, виставок
2	Поява конкурентів	Зменшення долі ринку	Вдосконалення та модернізація, розробка додаткових можливостей товару

Таблиця 4.7

#### Фактори можливостей

№ n/n	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Збільшення попиту, поява нових клієнтів	Завдяки можливості захисту ПВ без застосування тросів.	Забезпечення тісного контакту з споживачами, гарантійне обслуговування, пропозиції щодо інших товарів.

Проведений аналіз пропозиції: визначені загальні риси конкуренції на ринку описані в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8

### Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	олігополія	-
2. За рівнем конкурентної боротьби - локальний/національний/..	ринок країн СНГ та Європейського Союзу	Донесення інформації через сайт у вигляді реклами, відео. Влаштування конференцій, виставок.
3. За галузевою ознакою - міжгалузева/ внутрішньогалузева	внутрішньогалузева	-
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	товарно-родова	-
5. За характером конкурентних переваг - Цінова / нецінова	-	-
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	марочна	-

Після аналізу конкуренції проводиться більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, додаток А) (табл. 4.9).

Таблиця 4.9

**Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером**

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
	Немає.	Немає бар'єрів	Не впливають	Вплив споживачів і став поштовхом для ідеї	Не існує
<u>Висновки:</u>	Конкурентів немає	Можливості виходу на ринок є, конкурентів немає	Ні	Клієнтам потрібна змога повірити трифазні ТН	Обмеження відсутні

На основі аналізу конкуренції, проведеного в (табл. 4.9), а також із урахуванням характеристик ідеї проекту (табл. 4.2), вимог споживачів до товару (табл. 4.5) та факторів маркетингового середовища (табл. № 4.6-7) визначається та обґрунтовується перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється за табл. 4.10

Таблиця 4.10

**Обґрунтування факторів конкурентоспроможності**

<i>№</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)</i>
1	Надійність	Є більш надійним, ніж інші концепції.
2	Вартість	Через використання ОПН має більшу вартість.

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10) проводиться аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11).

Таблиця 4.11

**Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту**

№	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Надійність	18		+					
2	Вартість	20				+			
3	Собівартість	20	+						
4	Точність вимірювань	17							+
5	Сервіс	18	+						

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу ( матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 4.12) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 4.11).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12

**SWOT- аналіз стартап-проекту**

Сильні сторони: собівартість, надійність, сервіс, зменшення людського контролю за обладнанням	Слабкі сторони: вартість
Можливості: захист ПВ в складних умовах	Загрози: неусвідомленість споживачів

На основі SWOT-аналізу розробляються альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок (див. табл.4.9, аналіз потенційних конкурентів).

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 4.13).

Таблиця 4.13

**Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту**

<i>№</i>	<i>Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1	Розробка	100 %	5 міс.
2	Виготовлення	100 %	6 міс.
3	Випробування	100 %	3 міс.
4	Сертифікація	100 %	6 міс.
5	Вихід на ринок	100 %	1 рік.

#### 4.4. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 4.14).

Таблиця 4.14

##### Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
2	Виробники ВЛ	так	45%	немає	просто
3	Організації, що експлуатують ВЛ	так	65%	немає	просто
Які цільові групи обрано: всі цільові групи є потенційними клієнтами					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) автори ідеї обирають цільові групи, для яких вони пропонуватимуть свій товар, та визначають стратегію охоплення ринку:

1) якщо компанія зосереджується на одному сегменті – вона обирає стратегію концентрованого маркетингу;

2) якщо працює із кількома сегментами, розробляючи для них окремо програми ринкового впливу – вона використовує стратегію диференційованого маркетингу;

3) якщо компанія працює із всім ринком, пропонуючи стандартизовану програму (включно із характеристиками товару/послуги) – вона використовує масовий маркетинг.

Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформулювати базову стратегію розвитку (табл. 4.15).

Таблиця 4.15

### Визначення базової стратегії розвитку

<i>№ n/n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку*</i>
	Стратегія лідерства по витратам	Стратегія диференційованого маркетингу	Надійність, вартість, простота в експлуатації та обслуговуванні	Стратегія лідерства по витратам

Наступним кроком є вибір стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16).

Таблиця 4.16

### Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

<i>№ n/n</i>	<i>Чи є проект «періопроходцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкурентної поведінки*</i>
	Так	Шукати нових	Ні	Стратегія заняття конкурентної ніші

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту (див. табл. 4.5), а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку (табл. 4.15) та стратегії конкурентної поведінки (табл. 4.16) розробляється стратегія позиціонування (табл. 4.17). що



полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17

### Визначення стратегії позиціонування

<i>№ п/п</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
	Забезпечення захисту обладнання сертифікату	Стратегія лідерства по витратам	Можливість зменшення людського впливу	Висока надійність, простота в обслуговуванні

Результатом виконання підрозділу має стати узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку.

#### 4.5. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування *маркетингової концепції товару*, який отримає споживач. Для цього у табл. 4.18 потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18

### Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ п/п</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
	<i>Необхідність півірки трифазних ТН</i>	<i>Забезпечує цю можливість</i>	<i>Можливість півірки трифазних ТН, що інші забезпечити не можуть</i>

Надалі розробляється трирівнева маркетингова модель товару: уточняється ідея продукту та/або послуги, його фізичні складові, особливості процесу його надання (табл. 4.19).

Таблиця 4.19

### Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару		Сутність та складові		
I. Товар за задумом		Надає можливість захисту ПЛ.		
II. Товар у реальному виконанні		Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
		Якість: повинен відповідати всім електротехнічним стандартам, що стосуються захисту ВЛ		
		Пакування: повинен мати власну сумку з фірмовим написом,, транспортуватись повинен у фанерному ящику		
III. Товар із підкріпленням		До продажу: демонстрація роботи		
		Після продажу: навчання споживачів, сервісне обслуговування		
За рахунок чого потенційний товар буде захищено від копіювання: за рахунок нерозголошення розробницької таємниці				

Після формування маркетингової моделі товару слід особливо відмітити – чим саме проект буде захищено від копіювання. Захист може бути організовано за рахунок захисту ідеї товару (захист інтелектуальної власності), або ноу-хау, чи комплексне поєднання властивостей і характеристик, закладене на другому та третьому рівнях товару.

Наступним кроком є визначення цінових меж, якими необхідно керуватись при встановленні ціни на потенційний товар (остаточне

визначення ціни відбувається під час фінансово-економічного аналізу проекту), яке передбачає аналіз ціни на товари-аналоги або товари субститути, а також аналіз рівня доходів цільової групи споживачів (табл. 4.20).

Таблиця 4.20

### Визначення меж встановлення ціни

<i>№ п/п</i>	<i>Рівень цін на товари- замінники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
	1000 \$	-	100000\$	2000-7000\$

Наступним кроком є визначення оптимальної системи збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 4.21):

- проводити збут власними силами або залучати сторонніх посередників (власна або залучена система збуту);
- вибір та обґрунтування оптимальної глибини каналу збуту;
- вибір та обґрунтування виду посередників.

Таблиця 4.21

### Формування системи збуту

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
	Зв'язок через сайт, через комерційного директора, зустріч на виставках	Постачальником виступає сама фірма	Фірма довгий час співпрацює з ринком СНГ та ЄС	Доставка товару до споживача здійснюється шляхом грузових перевезень

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 4.22).

Таблиця 4.22

### Концепція маркетингових комунікацій

<i>№ п/п</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
	<i>Недостатньо інформований споживач, неусвідомлений</i>	<i>Сайт, електрона пошта, конференції, виставки</i>	<i>Необхідність метрологічної півірки трифазних трансформаторів напруги</i>	<i>Донесення можливостей та переваг товару до клієнту</i>	<i>Якщо Вам потрібна вимірювальна техніка – Вам до нас !</i>

#### 4.6. Висновки по розділу

Потреба в захисті ліній електропостачання є дуже високою, як в Україні так і за кордоном, тому проект є дуже рентабельним.

Розрахунки показали, що найкращий захист безтросової ділянки ПЛ забезпечується установкою ОПН на кожній опорі. З техніко-економічної точки зору найкращі показники щодо захисту ПЛ від прямих ударів блискавки досі дає застосування грозозахисного троса.

Подальша імплементація проекту є доцільною.

## ВИСНОВКИ

Вентильні розрядники не можуть забезпечити необхідну надійність захисту устаткування ПЛ від перенапруг. Потрібна заміна застарілих вентильних розрядників 110-750 кВ на сучасні ОПН без іскрового проміжку дозволить знизити впливу комутаційних і грозових перенапруг на обладнання ПС цих класів номінальної напруги.

При установці ОПН (в тому числі замість застарілих РВ) повинна бути перевірена відповідними моделювання його характеристик для задоволення умов експлуатації на кожній конкретній ПЛ або захисного обладнання.

Спосіб приєднання ОПН до проводів ПЛ - безіскрової або через іскровий проміжок. Обидва способи приєднання підвісного обмежувача до фазним проводам мають як переваги, так і недоліки. До основних переваг іскрового приєднання можна віднести відсутність постійно протікає струму в нормальному експлуатаційному режимі. Недоліком цього типу захисту є досить складна координація пробивних напруг відкритих іскрових проміжків з розрядними напруженнями захищається лінійної ізоляції. При виборі способу приєднання апарату до проводу насамперед повинні враховуватися всякого роду зовнішні чинники: забруднення ізоляторів і ОПН, можливість тривалого впливу підвищеної напруги промислової частоти і ін.

Ефективність захисту за допомогою ОПН в різних мережах помітно залежить від вибору апарату з оптимальними характеристиками для тої чи іншої лінії, в залежності від класу напруги.

**SPICE-код імітаційної моделі схеми дослідження впливу відстані між  
ОПН та об'єктом захисту (рис.3.3)**

```

G2 6 0 TABLE {V(6,0)} = ( {-1.091*Vr}, -20e3 ) ( {-
1.009*Vr}, -10e3 ) (
+ {-0.922*Vr}, -3e3 ) ( {-0.866*Vr}, -1e3 ) ( {-
0.788*Vr}, -1e2 ) (
+ {-0.623*Vr}, -2e-3 ) ( 0,0 ) ( {0.623*Vr}, 2e-3
) ( {0.788*Vr}, 1e2 ) (
+ {0.866*Vr}, 1e3 ) ( {0.922*Vr}, 3e3 ) ( {1.009*Vr},
10e3 ) ( {1.091*Vr}, 20e3
+ )
L1 4 5 0.828e-6
L2 5 6 2.484e-6
R1 4 0 1000e6
RG1 5 0 1G;added by G1
RG2 6 0 1G;added by G2
T1 2 0 3 0 TL0001
***
* Error: ANIMATED SPST SWITCH SWITCH1 not supported by
PSPICE
* Nodes: 4 2
* Attributes:
*   STATE: Closed
*   RON: 1m
*   ROFF: 1e15
*   SHAPEGROUP: Default
***
* Error: ANIMATED SPST SWITCH SWITCH2 not supported by
PSPICE
* Nodes: 7 1
* Attributes:

```

```

*   STATE: Closed
*   RON: 1m
*   ROFF: 1e15
*   SHAPEGROUP: Default
T2 1 0 2 0 TL0003
*
.MODEL TL0001 TRN (TD={50000*3.33333E-9} ZO=400)
.MODEL TL0002 TRN (TD={1000*6.66666E-9} ZO=50)
.MODEL TL0003 TRN (TD={100*3.33333E-9} ZO=400)
.MODEL TL0004 TRN (TD={100*3.33333E-9} ZO=450)
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC
DEFL=100u DEFW=100u DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFDPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10
PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m
+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
.LIB "D:\games\MC11\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.TRAN 1e-005 500e-6 0 1e-7
.PLOT TRAN v(3,0)
.PLOT TRAN v(2,0)
.PLOT TRAN v(1,0)
*
.PROBE
.END

```

SPICE-код імітаційної моделі схеми дослідження впливу відстані між ОПН та об'єктами захисту (рис.3.3.1)

C:\Users\glavie\Desktop\SUBSTATION\_PROTECTION\_IDEAL\_02  
(1).CIR Transient Analysis

\* Converted From Micro Cap Source file to PSPICE

\*

.FUNC DPWR(D) {I(D)\*V(D)}

.FUNC BPWR(Q) {IC(Q)\*VCE(Q)+IB(Q)\*VBE(Q)}

.FUNC FPWR(M) {ID(M)\*VDS(M)}

.FUNC HOTD(D,MAX) {IF((V(D)\*I(D)>MAX),1,0)}

.FUNC HOTB(Q,MAX)

{IF((VCE(Q)\*IC(Q)+IB(Q)\*VBE(Q)>MAX),1,0)}

.FUNC HOTF(M,MAX) {IF((VDS(M)\*ID(M)>MAX),1,0)}

.PARAM LOW3MIN={IMPORT(LOW3MIN.OUT,LOW3THRES)}

.PARAM HIGH3MAX={IMPORT(HIGH3MAX.OUT,HIGH3THRES)}

.PARAM LOWLVDS={IMPORT(LOWLVDS.OUT,LOWLIMIT)}

.PARAM HILVDS={IMPORT(HILVDS.OUT,HILIMIT)}

.PARAM LIMTLVDS={IMPORT(LIMTLVDS.OUT,LVDSLIMITS)}

.FUNC SKINAC(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS)

{((PI\*RADIUS\*RADIUS)/((PI\*RADIUS\*RADIUS)-PI\*(RADIUS-SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM))\*2))\*DCRES}

.FUNC SKINDEPTHAC(RESISTIVITY,RELPERM)

{503.3\*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM\*F)))}

.FUNC SKINTR(DCRES,RESISTIVITY,RELPERM,RADIUS,FREQ)

{((PI\*RADIUS\*RADIUS)/((PI\*RADIUS\*RADIUS)-PI\*(RADIUS-SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ))\*2))\*DCRES}

.FUNC SKINDEPTHTR(RESISTIVITY,RELPERM,FREQ)

{503.3\*(SQRT(RESISTIVITY/(RELPERM\*FREQ)))}

.PARAM VR=255.0E3



```

.PARAM VM=1000.0E3
C1 6 0 0.005e-6
C3 9 0 0.003e-6
C4 10 0 0.0005e-6
E1 3 0 VALUE = {1.151*Vm*(exp(-280*TIME)-exp(-
9200*TIME))}
G1 4 0 TABLE {V(4,0)} = ( {-1.277*Vr}, -20e3 )( {-
1.195*Vr}, -10e3 )(
+ {-1.108*Vr}, -3e3 )( {-1.052*Vr}, -1e3 )( {-
0.974*Vr}, -1e2 )(
+ {-0.810*Vr}, -2e-3 )( 0,0 )( {0.810*Vr}, 2e-3
)( {0.974*Vr}, 1e2 )(
+ {1.052*Vr}, 1e3 )( {1.108*Vr}, 3e3 )( {1.195*Vr},
10e3 )( {1.277*Vr}, 20e3
+ )
G2 5 0 TABLE {V(5,0)} = ( {-1.091*Vr}, -20e3 )( {-
1.009*Vr}, -10e3 )(
+ {-0.922*Vr}, -3e3 )( {-0.866*Vr}, -1e3 )( {-
0.788*Vr}, -1e2 )(
+ {-0.623*Vr}, -2e-3 )( 0,0 )( {0.623*Vr}, 2e-3
)( {0.788*Vr}, 1e2 )(
+ {0.866*Vr}, 1e3 )( {0.922*Vr}, 3e3 )( {1.009*Vr},
10e3 )( {1.091*Vr}, 20e3
+ )
L1 1 4 0.828e-6
L2 4 5 2.484e-6
R1 1 0 1000e6
RG1 4 0 1G;added by G1
***
* Error: ANIMATED SPST SWITCH SWITCH2 not supported by
PSPICE
* Nodes: 6 2
* Attributes:

```

```

*   STATE: Closed
*   RON: 1m
*   ROFF: 1e15
*   SHAPEGROUP: Default
RG2 5 0 1G;added by G2
T1 2 0 3 0 TL0004
T2 1 0 2 0 TL0001
***
* Error: ANIMATED SPST SWITCH SWITCH4 not supported by
PSPICE
* Nodes: 9 8
* Attributes:
*   STATE: Closed
*   RON: 1m
*   ROFF: 1e15
*   SHAPEGROUP: Default
T3 7 0 1 0 TL0003
***
* Error: ANIMATED SPST SWITCH SWITCH5 not supported by
PSPICE
* Nodes: 10 7
* Attributes:
*   STATE: Closed
*   RON: 1m
*   ROFF: 1e15
*   SHAPEGROUP: Default
T4 8 0 1 0 TL0002
*

.MODEL TL0001 TRN (TD={30*3.33333E-9} ZO=400)
.MODEL TL0002 TRN (TD={10*6.66666E-9} ZO=50)
.MODEL TL0003 TRN (TD={15*3.33333E-9} ZO=400)

```

```

.MODEL TL0004 TRN (TD={50000*3.33333E-9} ZO=450)
*
.OPTIONS ACCT LIST OPTS ABSTOL=1pA CHGTOL=.01pC
DEFL=100u DEFW=100u DEFNRD=0
+ DEFNRS=0 DEFDPD=0 DEFPS=0 DIGDRVF=2 DIGDRVZ=20K
DIGERRDEFAULT=20 DIGERRLIMIT=0
+ DIGFREQ=10GHz DIGINITSTATE=0 DIGIOLVL=2 DIGMNTYMX=2
DIGMNTYSCALE=0.4 DIGOVRDRV=3
+ DIGTYMXSCALE=1.6 GMIN=1p ITL1=100 ITL2=50 ITL4=10
PIVREL=1m PIVTOL=.1p RELTOL=1m
+ TNOM=27 TRTOL=7 VNTOL=1u WIDTH=80
*
.LIB "D:\games\MC11\library\NOM.LIB"
*
.TEMP 27
*
.TRAN 1e-005 500e-6 0 1e-7
.PLOT TRAN v(1,0)
.PLOT TRAN v(4,0)
.PLOT TRAN v(10,0)
*
.PROBE
.END

```

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Simulation of partial discharges under influence of impulse voltage // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 1, No. 1 (39). P. 36–41. doi: 10.15587/2312-8372.2018.123309
2. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Олексієнко В.П. Моделювання часткових розрядів при впливі грозових та комутаційних імпульсів напруги // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 589-593.
3. E. Gulski, "Digital analysis of partial discharges," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 2, no. 5, pp. 822-837, Oct. 1995. doi: 10.1109/94.469977
4. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Стенд для дослідження характеристик часткових розрядів в ізоляції електроустаткування високої напруги // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 594-597.
5. Проценко О.Р., Троценко Є.О., Малафійчук Л.В., Яременко Д.С. Розробка фільтра верхніх частот для стенду з дослідження характеристик часткових розрядів // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 598-602.
6. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Experimental study and modeling of partial discharge detection system // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 4, No. 1 (42). P. 17–22. doi: 10.15587/2312-8372.2018.139942
7. Trotsenko Ye., Brzhezitsky V., Protsenko O., Chumack V., Haran Ya. Effect of voltage harmonics on pulse repetition rate of partial discharges // Technology audit and production reserves. 2018. Vol. 2, No. 1 (40). P. 37–44. doi: 10.15587/2312-8372.2018.126626
8. Троценко Є.О., Бржезицький В.О., Проценко О.Р., Малафійчук Л.В., Михалицький В.Л. Дослідження часткових розрядів при впливі напруги змінного та постійного струму // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2018. – С. 586-588.
9. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky and O. Protsenko, "Partial Discharge as Threat to Insulation of High Voltage Direct Current Transmissions," 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (ESS), Kyiv, Ukraine, 2019, pp. 24-27. doi: 10.1109/ESS.2019.8764201
10. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Protsenko and V. Mykhailenko, "Application of Three-Capacitance Models for Simulation of Partial Discharges in Solid Dielectric Containing Several Cavities," 2019 IEEE 2nd

- Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 279-282. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879931
11. Anokhin Y. L. Application of high voltage dividers for power quality indices measurement / Y. L. Anokhin, V. O. Brzhezitsky, Ya. O. Haran, I. M. Masliuchenko, O. P. Protsenko, Ye. O. Trotsenko // *Electrical engineering & electromechanics*. – 2017. – No. 6. – P. 53-59. doi: 10.20998/2074-272X.2017.6.08
  12. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky, O. Protsenko, Y. Haran and V. Chumack, "Calculation of High Voltage Divider Accuracy Using Duhamel's Integral," 2018 IEEE 17th International Conference on Mathematical Methods in Electromagnetic Theory (MMET), Kyiv, Ukraine, 2018, pp. 213-216. doi: 10.1109/MMET.2018.8460314
  13. M. Wu, H. Cao, J. Cao, H. Nguyen, J. B. Gomes and S. P. Krishnaswamy, "An overview of state-of-the-art partial discharge analysis techniques for condition monitoring," in *IEEE Electrical Insulation Magazine*, vol. 31, no. 6, pp. 22-35, November-December 2015. doi: 10.1109/MEI.2015.7303259
  14. Троценко Є. О. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг в Micro-Cap / Є. О. Троценко, В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко // *Технологічний аудит та резерви виробництва*. – 2016. – № 6/1 (32). – С. 26-30.
  15. Trotsenko Ye. Study of surge arrester model under influence of various current pulses / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – № 1/1 (33). – P. 44-48. doi: 10.15587/2312-8372.2017.92244
  16. Коваль А. А. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг / А. А. Коваль, О. Р. Проценко, Є. О. Троценко // *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*. – 2016. – С. 354-356.
  17. Brzhezitsky V. Analysis and comparison of metal-oxide surge arrester models / V. Brzhezitsky, Ye. Trotsenko, Ya. Haran // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – № 6/1 (38). – P. 40-46. doi: 10.15587/2312-8372.2017.117836
  18. Trotsenko Ye. Effect of piecewise linear current waveforms on surge arrester residual voltage / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – № 2/1 (34). – P. 25-31. doi: 10.15587/2312-8372.2017.97507
  19. Trotsenko Ye. Analytical representation of switching current impulses for study of metal-oxide surge arrester models / Ye. Trotsenko, V. Brzhezitsky, I. Masluchenko // *Technology audit and production reserves*. – 2017. – № 5/1 (37). – P. 24-29. doi: 10.15587/2312-8372.2017.109662
  20. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Філіпп Г. Д. Дослідження спрощеної моделі нелінійного обмежувача перенапруг // *Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики"*. – 2017. – С. 612-615.

21. Бржезицький В. О., Троценко Є. О., Яременко Д. С. Оцінка форми струмів, що протікають крізь нелінійний обмежувач перенапруг при грозових перенапругах // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенергетехніки та автоматики". – 2017. – С. 616-618.
22. Y. Trotsenko, V. Brzhezitsky and V. Mykhailenko, "Revised Effect of Inductive Voltage Drop Across Line Lead on Protective Level of Surge Arrester," 2019 IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering (UKRCON), Lviv, Ukraine, 2019, pp. 341-344. doi: 10.1109/UKRCON.2019.8879939
23. Бржезицький В. О. Дослідження причин електричного перекриття підтримуючих ізолюючих підвісок середньої фази повітряної лінії електропередачі / В. О. Бржезицький, А. А. Щерба, О. Д. Подольцев, Є. О. Троценко, С. Ю. Шевченко, Я. О. Гаран, С. Атарод // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2011. – № 6 – С. 36-41.
24. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Ісаєв В.В., Кікало В.М., Лапченко А.М., Маслюченко І.М., Троценко Є.О. Мобільна повірочна лабораторія класів напруги 0,22...110 кВ // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VI наук.-практ. конф. / Уклад.: В. М. Кікало, С. В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 202-204.
25. W. D. Rust, "Utilization of a mobile laboratory for storm electricity measurements," Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1989, Vol. 94, No. D11, pp. 13305-13311. doi: 10.1029/JD094iD11p13305
26. Бржезицький В.О., Кікало В.М., Копшин В.В., Маслюченко І.М., Смородіна Л.С., Троценко Є.О. Метод визначення похибок незаземлюваних високовольтних трансформаторів напруги // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. V наук.-практ. конф. / Уклад.: В. В. Копшин, С. В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2005. – С. 101-105.
27. Бржезицький В.О., Бржезицький В.В., Волощенко В.В., Кікало В.М., Маслюченко І.М., Троценко Є.О. Еталонні високовольтні трансформатори напруги тороїдального типу // Метрологічне забезпечення обліку електричної енергії в Україні: Матер. VI наук.-практ. конф. / Уклад.: В.М. Кікало, С.В. Білоус. – К.: АБЕГА, 2007. – С. 96.
28. Бохан А. Н. Динамічна модель обмежувача напруг нелінійного для дослідження внутрішніх перенапруг в розподільчих мережах [Електронний ресурс] / А. Н. Бохан, В. В. Кротенок // Вістник Гомельського державного технічного університету. – 2014. – Режим доступу до ресурсу: <https://cyberleninka.ru/article/n/dinamicheskaya-model-ogranichitelya-perenapryazheniya-nelineynogo-dlya-issledovaniya-vnutrennih-perenapryazheniy-v>.

29. Martinez-Velasco J. Surge Arresters / Juan A. Martinez-Velasco [Text]// Power System Transients Parameter Determination / Juan A. Martinez-Velasco., 2010. – (CRC Press Taylor & Francis Group). – С. 351–447.
30. Durbak D.W. Zinc-oxide arrester model for fast surges [Text] / D. W. Durbak // EMTP Newsletter. – 1985. – Vol. 5, No. 1. – P. 1-9.
31. IEEE Working Group 3.4.11. Modeling of metal oxide surge arresters [Text] / IEEE Working Group 3.4.11 // IEEE Transactions on power delivery. – 1992. – Vol. 7, No. 1. – P. 302-309.
32. Pinceti P. A simplified model for zinc oxide surge arresters [Text] / P. Pinceti, M. Giannettoni // IEEE Transactions on power delivery. – 1999. – Vol. 14, No. 2 – P. 393-398.
33. Fernandez F. Metal-oxide surge arrester model for fast transient simulations [Text] / F. Fernandez, R. Diaz // Proceedings of 2001 International conference on power system transients. – 2001. – P. 681-687.
34. Magro M. C. Validation of ZnO surge arresters model for overvoltage studies [Text] / M. C. Magro, M. Giannettoni, P. Pinceti // IEEE Transactions on power delivery. – 2004. – Vol. 19, No. 4. – P. 1692-1695.
35. Micro-Cap 11. Electronic Circuit Analysis Program. Reference Manual. [Electronic resource]. – Sunnyvale, CA: Spectrum Software. 2014. – 1040 p. – Available at: \www/URL: <http://www.spectrum-soft.com/down/rm11.pdf>
36. Троценко Є. О. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг в Micro-Cap [Текст] / Є. О. Троценко, В. О. Бржезицький, І. М. Маслюченко // Технологічний аудит та резерви виробництва. – 2016. – № 6/1 (32). – С. 26-30.
37. Коваль А. А. Моделювання нелінійного обмежувача перенапруг [Текст] / А. А. Коваль, О. Р. Проценко, Є. О. Троценко // Міжнародний науково-технічний журнал молодих учених, аспірантів і студентів "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики". – 2016. – С. 354-356.